

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

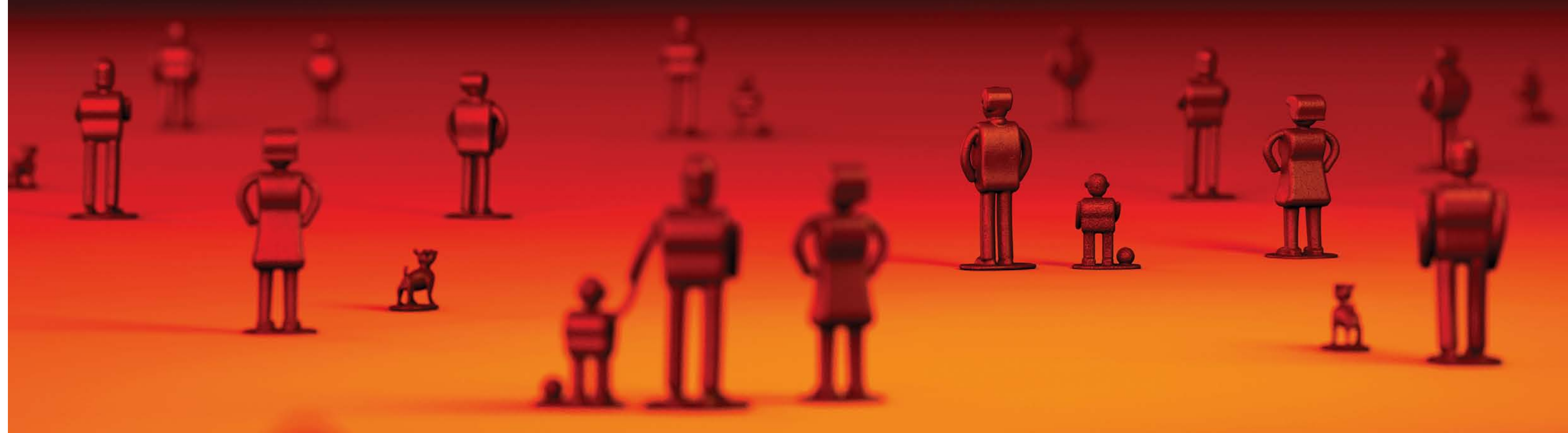
Junio 2020 • N.º 525 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INFORME ESPECIAL

EL MUNDO ANTE LA PANDEMIA

Cómo está afrontando la ciencia los retos que plantea el nuevo coronavirus



CAMBIO CLIMÁTICO
El calentamiento del Mediterráneo

MATEMÁTICAS
El problema de los tres cuerpos

ARQUEOLOGÍA
Los orígenes del arte narrativo



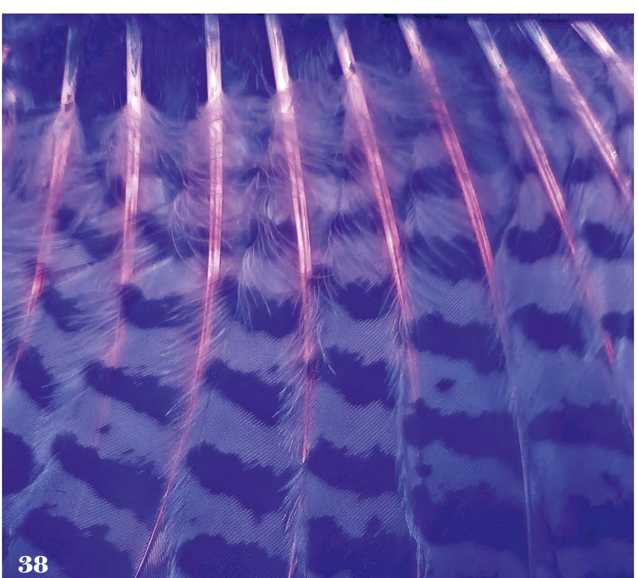
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
EL MUNDO ANTE LA COVID-19 | ORÍGENES DEL ARTE NARRATIVO | EL CALENTAMIENTO DEL MEDITERRÁNEO
N.º 525
JUNIO 2020





ILUSTRACIÓN DE RICHARD BORGE


4


38


43

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

En cuestión de semanas, el virus del SARS-CoV-2 ha infectado a millones de personas, ha quitado la vida a miles de ellas y ha detenido la economía mundial. En el informe especial incluido en este número, varios autores analizan los posibles orígenes del coronavirus, el estado actual de la búsqueda de tratamientos y vacunas y el futuro desenlace de la pandemia. Ilustración de Richard Borge.



redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo 2020

GALILEO Y LA CONSCIENCIA

En «El gran error de Galileo» [Investigación y Ciencia, marzo de 2020], Philp Goff propugna que para afrontar el problema de la consciencia superemos el paradigma de Galileo, basado en reducir la naturaleza a sus propiedades cuantitativas. Ello se debería a que la consciencia solo se manifiesta cuando el sujeto se enfrenta a los aspectos cualitativos, no cuantitativos, de los entes naturales.

Sin embargo, también cuando nos planteamos la realidad natural desde la perspectiva del sujeto consciente, toda ella se reduce a la consciencia, pues las leyes matemáticas con que Galileo cuantificó los fenómenos naturales no son sino entes ideales; es decir, necesitan un sujeto consciente que las piense, por lo que no forman parte de la naturaleza exterior al sujeto. De hecho, si el filósofo George Berkeley estaba en lo cierto con su lema *esse est percipi* («ser es ser percibido»), la propia naturaleza no existiría sin un sujeto consciente que la percibiese.

En conclusión, lo que un sujeto puede conocer acerca de la consciencia se reduce a su propia actividad consciente. Y no parece posible que las ciencias empíricas lleguen a establecer qué es la consciencia por medio de una teoría basada en experimentos exteriores a ella, más allá de la mera correlación mencionada por el autor entre las distintas tareas mentales y la excitación de ciertas áreas del cerebro.

José Enrique García Pascua
Torrecaballeros, Segovia

No estoy de acuerdo con el planteamiento general del artículo de Goff («Cuando un árbol se derrumba en un bosque, el ruido que hace al caer no está realmente en el bosque, sino en la consciencia del espectador. Sin espectador, sin consciencia, no hay sonido»). El sonido que se produce cuando cae un árbol no depende de que haya un observador o no, puesto que las ondas de presión existen sin él.

En los tiempos de Galileo no se conocía la existencia de las neuronas ni las funcionalidades del cerebro, por lo que no podían modelizarse las sensaciones de ningún tipo. Pero hoy existen modelos matemáticos para determinar el efecto del sonido cuando, en forma de impulsos nerviosos, llega a distintas partes del cerebro y las activa de diversas maneras. Por tanto, y al menos hasta este punto, el modelo científico que se apoya en las matemáticas seguiría siendo válido.

Que aún desconozcamos el origen de la consciencia no quiere decir que esta no pueda modelizarse matemáticamente. Puede que dicha modelización no sea posible, pero no lo sabremos hasta que no conozcamos la naturaleza de la consciencia y podamos detectarla y medirla.

José Medina Ferrer
Rivas-Vaciamadrid, Madrid

Responde Goff: *Sobre la observación de García Pascua, convengo en que todo conocimiento está mediado por la consciencia, y que esta es lo único que sabemos con certeza que es real. Pero si solo creo en aquello cuya existencia puedo tener por segura acabaré en el solipsismo: la idea de que mi mente consciente es lo único que existe. Nunca podremos saber con certeza que otras personas existen, ni si, como observara Bertrand Russell, el mundo fue creado hace más de cinco minutos. Para vivir necesitamos confiar en nuestros recuerdos y en que las personas con las que nuestra experiencia sensorial parece ponernos en contacto son reales.*

Tal vez esas otras personas sean mentes conscientes no físicas, como supuso Berkeley. Pero este punto de vista necesita explicar las regularidades de nuestras experiencias. ¿Por qué, cuando mi esposa y yo miramos en la misma dirección, ambos tenemos la experiencia de una mesa? Berkeley postuló un Dios que interviene constantemente, pero en mi opinión este supuesto es extravagante y poco elegante. Michael Pelczar y Donald Hoffman han abordado el problema sin recurrir a Dios, y su trabajo reviste un enorme interés. Sin embargo, encuentro mucho más simple postular un mundo físico compartido. ¿Por qué mi esposa y yo experimentamos una mesa? Porque ahí fuera hay una mesa que causa dicha experiencia.

Sin embargo, para evitar el gran error de Galileo, mi postura adopta una concepción «panpsíquica», en lugar de materialista, de la realidad: hay un mundo físico ahí fuera, pero también este se encuentra impregnado de consciencia. Esta es la parte positiva de mi libro Galileo's error *(Pantheon, 2019).*

En cuanto al comentario de Medina Ferrer, todo depende de lo que entendamos por «sonido». Si nos referimos a las vibraciones del aire, hay un sonido ahí fuera independiente del observador. Pero si nos referimos al sonido cualitativo que surge en nuestra experiencia, no estoy de acuerdo en que exista en el mundo físico.

Los coetáneos de Galileo manejaban algunas teorías rudimentarias sobre el cerebro. Hoy nuestra comprensión es mucho mejor, pero eso no ha marcado la más mínima diferencia con respecto al problema de la consciencia. Este radica en que la ciencia física (ya sea la de la época de Galileo o la nuestra) trabaja con un vocabulario puramente cuantitativo, y las cualidades de la consciencia no pueden encapsularse en esos términos. La física no puede transmitir a un neurocientífico daltónico lo que es ver el color rojo.

Admito que podamos modelizar matemáticamente la consciencia y que tales modelos sean útiles. Sin embargo, se abstraen de las cualidades implicadas, por lo que solo cuentan una historia parcial. La situación recuerda a los modelos en economía, los cuales pueden resultar muy útiles, pero se abstraen de los detalles relativos a las personas y su trabajo.

Creo que atravesamos una fase de la historia en que nos vemos arrastrados por el éxito de la física, lo que nos lleva a pensar que la física es la única fuente de conocimiento y que todo lo demás es superstición. La ironía es que, si la física ha tenido tanto éxito, ha sido porque fue diseñada para describir parcialmente la realidad, dejando fuera aquellos aspectos que no pueden ser descritos por las matemáticas.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



La Sputnik Planitia (el lóbulo izquierdo del «corazón» de Plutón) y el terreno caótico situado en sus antípodas podrían haberse formado en la misma colisión.

PLANETOLOGÍA

Colisiones en Plutón

Las simulaciones de un antiguo impacto refuerzan la idea de que el planeta enano posee un océano subterráneo

Tombaugh Regio, una estructura reflectante con forma de corazón, es uno de los elementos más llamativos de Plutón. Durante su sobrevuelo de 2015, la nave espacial New Horizons de la NASA captó bellas y nítidas imágenes de este colosal accidente geológico. Su lóbulo occidental, una depresión elíptica de unos 2000 kilómetros de longitud conocida como Sputnik Planitia, llamó la atención de los investigadores, ya que parece un cuenco tallado por un antiguo y descomunal impacto. Hoy la llenan témpanos de hielo de nitrógeno más recientes y sometidos a procesos convectivos.

Aunque la New Horizons apenas pudo ver la otra cara de Plutón, logró echar un vistazo lejano y detectar una región que parecía un rompecabezas de grietas, montículos y hoyos, justo en las antípodas de la Sputnik Planitia. A falta de un mecanismo claro de formación, los científicos comenzaron a especular sobre el origen de esa zona.

Una nueva investigación señala a la colisión que creó la Sputnik Planitia. Según las simulaciones, el cataclismo produjo potentes ondas sísmicas que se propagaron alrededor y a través de Plutón, y rasgaron la superficie de la cara opuesta. Pero lo más importante es que la transmisión de esas ondas —y la consiguiente creación de un terreno caótico de esas dimensiones concretas— parece depender de que Plutón albergue un océano subterráneo de agua líquida de 150 kilómetros de espesor, una posibilidad que los científicos contemplan desde hace tiempo.

El estudio iba a presentarse el pasado marzo en la Conferencia de Ciencia Lunar y Planetaria, que fue cancelada. El modelo se halla en una fase inicial y aún no se ha sometido al proceso de revisión por pares. Sin embargo, relacionar impactos con estructuras geológicas distantes para deducir la estructura interna de Plutón es «una idea realmente novedosa», valora James Tuttle Keane, planetólogo del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, quien no participó en el estudio.

Según Paul Byrne, geólogo planetario de la Universidad Estatal de Carolina del Norte que tampoco tomó parte en la investigación, si este método basado en si-

NASA, JHUAPL Y SWRI

mular la sismología planetaria resulta ser válido, tal vez desvele más secretos aparte de los de Plutón. La idea podría aplicarse a todo tipo de mundos helados, desde las lunas de los gigantes de hielo del sistema solar hasta los gélidos mastodontes que se ocultan en el cinturón de Kuiper. Para Jani Radebaugh, planetóloga de la Universidad Brigham Young ajena al nuevo trabajo, este nos recuerda el valor incalculable de la fugaz visita de la New Horizons a Plutón. «Es increíble todo el partido que le estamos sacando», subraya.

La ubicación de la Sputnik Planitia sugiere que hay un océano bajo la superficie de Plutón, pero hacen falta más pruebas para confirmarlo. Los científicos emplean robots para detectar las ondas sísmicas que cruzan la Tierra, la Luna y Marte. Tales ondas se reflejan, desvían y retuercen en función del material que atraviesan, brindándonos una imagen de las capas subterráneas del astro. Pero este método no es viable en el remoto Plutón, donde no hay robots exploradores.

Los investigadores encontraron ayuda a miles de millones de kilómetros de distancia, en Mercurio. Su cuenca Caloris, un cráter de impacto de unos 1525 kilómetros de diámetro, se halla en las antípodas de un desbarajuste geológico de rocas quebradas e intrincada topografía ondulante. «No hay nada igual en ningún otro lugar del planeta», afirma Radebaugh. Durante mucho tiempo, los investigadores han pensado que ese terreno caótico fue producto de la violenta creación de Caloris, igual que la accidentada región opuesta a la Sputnik Planitia pudo deberse a la colisión que excavó esta llanura.

Así que los científicos se preguntaron: ¿por qué no recrear la sismología de Plutón para averiguarlo? Recurrieron al modelo iSALE, que simula impactos a escala planetaria y reproduce la física de los choques. Adeene Denton, geóloga planetaria de la Universidad Purdue y autora principal del estudio, comenta que «ha hecho volar Plutón en pedazos en incontables ocasiones».

La simulación que mejor reproduce las dimensiones de la Sputnik Planitia y del terreno destrozado en las antípodas de Plutón se basa en el impacto de un proyectil de 400 kilómetros de diámetro y que se desplaza a 7200 kilómetros por hora. En el modelo, la potente onda de choque que se propaga a través de Plutón mientras se forma la Sputnik Planitia va seguida de una onda de presión, que causa deformaciones y cuyo movimiento depende de la velocidad del sonido en el material por el que viaja. Esta onda atraviesa el núcleo rocoso de Plutón con relativa rapidez y se propaga lentamente a través de la corteza de hielo del planeta, y aún más despacio por el océano de agua líquida de 150 kilómetros de espesor que habría entre ambas capas.

En la simulación que mejor se ajusta a los datos, el núcleo de Plutón está compuesto de serpentina, una roca que transmite las ondas de presión más despacio que otras posibles candidatas. Eso reduce la diferencia entre la velocidad del sonido en el núcleo y en el océano, lo cual permite que se propague más energía sísmica a través de este último hacia el lado opuesto del planeta. Como resultado, una enorme cantidad de esa energía alcanza la región opuesta a la Sputnik Planitia, la suficiente para crear las características geológicas observadas por la New Horizons.

Aun así, Byrne advierte de que las imágenes de esa mitad de Plutón tienen menor resolución que las del lado de la Sputnik Planitia, por lo que no es fácil determinar qué es lo que muestran. «Se observan muchas estructuras extrañas en la cara alejada de Plutón», apunta Keane, «y podemos imaginar muchas formas distintas de generarlas». Una de ellas son los hielos volátiles de metano, dióxido de carbono y nitrógeno que erosionan el paisaje de Plutón a medida que fluctúan entre los estados gaseoso y sólido. Tales gases podrían ser los responsables de algunos terrenos inusuales, como el situado en las antípodas de la Sputnik Planitia. (Otro estudio reciente e independiente también achaca la creación del terreno caótico opuesto a la cuenca Caloris, en Mercurio, a las sustancias volátiles.)

Pero si el nuevo modelo es correcto, confiere más credibilidad a la idea de que Plutón y sus parientes helados pueden presentar grandes océanos bajo la superficie. Lejos de ser meras bolas de nieve congeladas, concluye Denton, «todos podrían tener historias geológicas increíblemente ricas».

—Robin George Andrews

MEDICINA

El transporte de las vacunas

Estos tratamientos esenciales podrían ser suministrados en una película flexible

Las vacunas podrían figurar pronto en películas. Dirigido por Maria Croyle, un equipo de la Universidad de Texas en Austin ha creado una lámina delgada que conserva, sin refrigeración, las vacunas y otros medicamentos biológicos durante largos períodos. Esto significa que los viales rigurosamente refrigerados con los que se envían hasta ahora podrían ser sustituidos por finas películas despegables y embaladas en sobres que se guardarían sin más en un estante o un cajón.

El laboratorio de Croyle comenzó el desarrollo en 2007. Inspirados por la capacidad del ámbar para conservar el ADN de los insectos y otros organismos, los investigadores se lanzaron a crear su propia versión de esta sustancia mezclando «una generosa cantidad de azúcar y una pizca de sal, de modo muy similar a un caramelo duro», explica Croyle. La vacuna que contiene se administra por vía oral, una buena noticia para todos aquellos que no soportan las agujas.

Los componentes de la película se ajustan a cada tipo de vacuna y proporcionan un recubrimiento protector. «Con el tiempo hemos aprendido que la clave para que cualquier sustancia depositada en la película permanezca realmente estable radica en la mezcla concienzuda de todos los componentes», explica Croyle, a lo que añade que la fabricación es rápida y solo requiere aparatos de sobremesa corrientes y asequibles. «Ante todo queríamos concebir algo asumible para los países en vías de desarrollo.»

La refrigeración durante el transporte (entre 2 y 8 ºC) suele ser imprescindible en los programas de vacunación. En ocasiones deben recorrerse miles de kilómetros hasta alcanzar lugares remotos. La distribución puede resultar difí-

THOMAS FUCHS

TECNOLOGÍA

Detector de metales pesados

Un dispositivo barato y seguro permite controlar la calidad del agua



Los residuos electrónicos y otras fuentes de metales pesados pueden contaminar las aguas municipales, pero recoger muestras, preservarlas químicamente y llevarlas a un laboratorio para su análisis supone un reto para algunas comunidades remotas.

A fin de optimizar el proceso, Emily Hanhauser, ingeniera mecánica del Instituto Tecnológico de Massachusetts, y sus colaboradores han desarrollado un sencillo dispositivo para tomar muestras que se puede fabricar por menos de dos euros. El sistema consiste en un mango de plástico unido a una especie de hélice hecha de malla de polímero, en cuyas palas hay compartimentos con microesferas de una resina capaz de absorber los iones de los metales pesados. El dispositivo se agita en el agua y luego se seca con un paño o al aire. Al sumergir las palas en una solución ácida, se liberan los iones absorbidos y puede medirse su concentración.

A diferencia de las muestras de agua contaminada, que se consideran peligrosas, el nuevo dispositivo puede enviarse por correo a los centros de análisis sin correr ningún riesgo. Y sus inventores aseguran que es capaz de arrojar resultados tras dos años de almacenamiento. En los experimentos, el instrumento reflejó con precisión las cantidades de cobre, níquel, plomo y cadmio añadidas a diversas muestras de agua, según refirieron los investigadores el pasado marzo en la revista *Environmental Science and Technology*.

Lo ideal sería poder realizar un análisis detallado de la calidad del agua cerca de la fuente, para no tener que enviar las muestras, señala Hanhauser. Sin embargo, las herramientas diseñadas para ese propósito no logran cuantificar niveles suficientemente pequeños de contaminantes y sus resultados a menudo presentan grandes variaciones, asegura la investigadora. El instrumento desarrollado por su grupo podría brindar a las comunidades más apartadas y a los propietarios de pozos —que en Estados Unidos son los responsables de controlar la calidad de su agua— una alternativa viable para no tener que transportar volúmenes considerables de muestras líquidas a grandes distancias. Un modelo más avanzado del dispositivo también podría medir grandes aglomeraciones de metales contaminantes, añaden los autores.

«Creo que podría ser una buena herramienta de diagnóstico, debido a su reducido coste, buenas cifras de recuperación de metales y superioridad sobre las pruebas de presencia/ausencia», valora Siddhartha Roy, ingeniero ambiental del Instituto Politécnico de Virginia, que estudia la tristemente famosa agua potable de Flint, en Míchigan (origen de una crisis de salud pública que se remonta a 2014), y que no participó en el nuevo estudio. «Puedo imaginarme una versión mejorada del dispositivo que sirva para detectar metales concretos tras un vertido.»

—Rachel Crowell

---

cil y costosa, y las vacunas se echan a perder si ocurre algún incidente durante el trayecto.

En cambio, la formulación de Croyle conserva varios meses los virus vivos, las bacterias y los anticuerpos a temperatura ambiente (20 °C). En un artículo novedoso, publicado en marzo en *Science Advances*, describieron cómo una vacuna contra el ébola elaborada con virus generaba una respuesta inmunitaria incluso al cabo de 36 meses. Asimismo, comprobaron que una vacuna antigripal suspendida en su película daba tan buen resultado como otra convencional. «El estudio demuestra de forma preliminar la viabilidad del soporte para el desarrollo de vacunas», afirma Lisa Rohan, farmacóloga en la Universidad de Pittsburgh, que no ha participado en el estudio. Destaca que cada tipo de vacuna requeriría una formulación a medida para proseguir con el proceso de desarrollo.

El principal escollo ahora es encontrar un socio para ampliar la escala de fabricación de cara a los ensayos clínicos, aclara Croyle. El equipo también estudia métodos de acondicionamiento que mantengan las películas estables hasta los 40 °C.

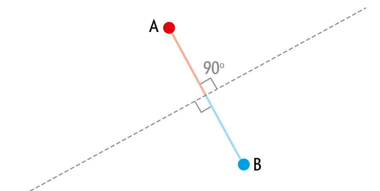
El tamaño es otra de las grandes virtudes del soporte: en una lámina de las dimensiones de un folio caben más de 500 dosis vacunales, con un peso 900 veces menor que el de las mismas dosis envasadas en viales. Gracias al abaratamiento y la simplificación del envío y de la conservación, el nuevo método mejoraría sin duda los índices de vacunación en todo el mundo, especialmente en los países en vías de desarrollo.

—Harini Barath

MELANIE GONICK, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS

Errata corrige

Tal y como nos informa nuestro lector Miguel Sánchez Martín, el epígrafe de la segunda figura del artículo **Diagramas de Voronói** [por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, abril de 2020] llama erróneamente «bisectriz» a lo que en realidad son las mediatrices (*línea discontinua*) de los segmentos representados.



El artículo **Predicción de olas gigantes** [Rachel Berkowitz; Investigación y Ciencia, mayo de 2020] describía como matemáticos a los autores del trabajo reseñado. Tal y como nos comunica el Colegio Oficial de Físicos, los autores son en realidad físicos especializados en física matemática.

Estas correcciones han sido incorporadas a la versión digital de los artículos correspondientes.

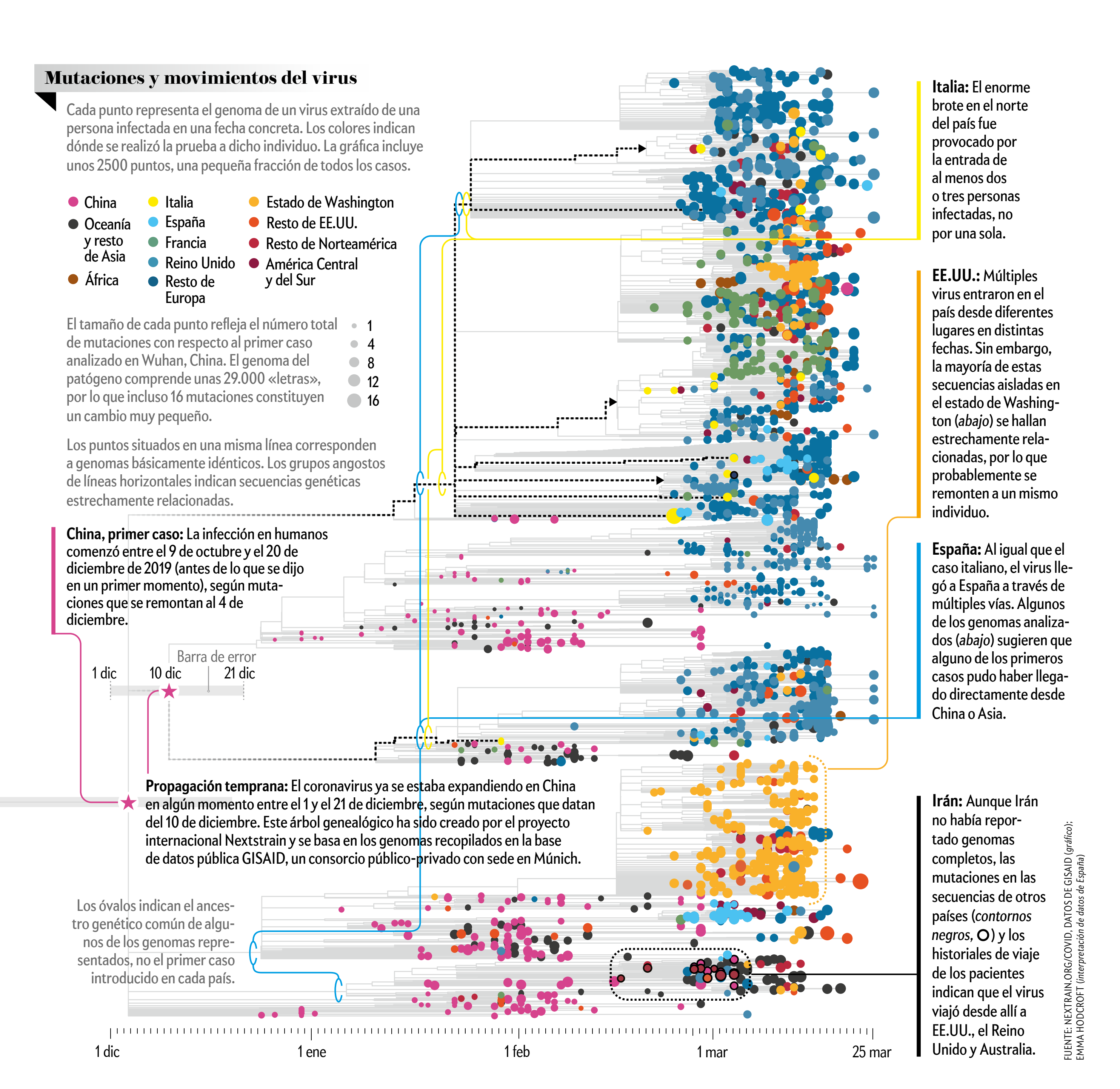
GENÓMICA

Así se propaga la COVID-19

Las mutaciones del nuevo coronavirus revelan su historial de viajes por el mundo

Para entender cómo se ha extendido el nuevo coronavirus y cuándo llegó a cada lugar, una herramienta de gran valor la proporcionan las secuencias genéticas del patógeno y sus mutaciones (*gráfico*). Estas han revelado que el virus saltó de un animal a humanos en China, que estos se contagiaron entre sí en el país asiático, y que quienes viajaron desde allí lo propagaron después por el resto del mundo. A fecha de 31 de marzo, el virus no había mutado de manera significativa, lo que indica que fue el contacto humano lo que provocó la pandemia, no un patógeno que muta de manera salvaje. Cartografiar su propagación indica qué medidas podrían haber desacelerado el contagio: tests rápidos y generalizados en China, restricciones de viaje más estrictas y tempranas, aislamiento de las personas infectadas y un distanciamiento social más inmediato en todo el globo.

—Mark Fischetti y Martin Krzywinski





Faisán macho

ANTROPOLOGÍA

El consumo de faisán, anterior al de pollo

Un nuevo análisis genético alborota la historia de la domesticación de las aves de corral

El pollo doméstico es, con mucho, el ave más abundante del planeta, con una población que se sitúa en torno a los 23.000 millones. Pero, ahora, una nueva investigación apunta a que otra especie fue antaño un serio aspirante al título de ave de corral predilecta de la humanidad: antiguos restos óseos descubiertos en China han resultado pertenecer no a los primeros pollos domesticados que se creía desde hace tiempo, sino a faisanes. Además, todo indica que los faisanes silvestres convivieron con las personas, lo cual arroja una nueva luz sobre los orígenes del proceso de domesticación.

«No es frecuente encontrar vestigios de cérvidos que sugieran su cohabitación con los cazadores-recolectores, por ejemplo», aclara Loukas Barton, arqueólogo de Dudek, una empresa de asesoría medioambiental de California. «Pero en este caso hemos visto que un animal que consideramos salvaje estuvo conviviendo en un entorno humano.» Barton es el autor principal del estudio, publicado en febrero en *Scientific Reports*.

La mayoría de los arqueólogos había supuesto que los huesos de aves hallados junto a otros de cerdo y perro, revueltos con útiles agrícolas, en yacimientos de 8000 años de antigüedad en el norte de China, eran la prueba más antigua de la domesticación del pollo. Pero muchos se preguntaban de qué modo el gallo bankiva —reconocido como el antepasado silvestre del pollo y la gallina actuales— pudo surgir de repente a más de 1500 kilómetros de su hogar original, en el sudeste asiático. En 2015 se planteó la posibilidad de que los restos óseos perteneciesen a faisanes, que son autóctonos del norte de China.

Para obtener una respuesta definitiva, Barton y sus colaboradores analizaron los huesos de ocho aves desenterradas en el yacimiento neolítico de Dadiwan, en la provincia de Gansú, datado en 7500 años, que habían sido identificados como pertenecientes a pollos. Los investigadores de la Universidad de Oklahoma usaron dos métodos, entre ellos la secuenciación íntegra del genoma mitocondrial, para confirmar que los huesos pertenecieron a faisanes.

Las pruebas bioquímicas revelaron que esos faisanes subsistieron básicamente con mijo, un cereal cultivado, lo que induce a pensar que convivieron con humanos durante todo el año, un primer paso hacia la domesticación. Barton afirma que el proceso probablemente corrió paralelo al de la domesticación del gallo: algunas aves silvestres comenzaron a entablar un contacto prolongado con los pobladores humanos y acabaron trabando una relación de interdependencia con ellos. Sin embargo, la domesticación verdadera entraña la modificación morfológica o genética a través de la selección artificial; el genoma de estos antiguos faisanes no se diferencia del de los ejemplares actuales, por lo que técnicamente seguían siendo silvestres.

Yu Dong, genetista en la Universidad de Shandong, califica los hallazgos en calidad de observador externo como «muy importantes», pues aportan un nuevo retazo trascendente de la historia de la domesticación. Eso sí, se pregunta si la presencia de los faisanes era bienvenida por las gentes del Neolítico. «En muchos lugares los campos se cubren hoy con redes para que no devoren los sembrados», apunta.

Barton cree que los antiguos pobladores vieron en el faisán una fuente de carne, pero sospecha que su puesta intermitente hizo que se decantaran por la gallina y su puesta más continuada como fuente de huevos, lo cual tal vez explique «por qué hoy no comemos faisán asado los domingos».

—Rachel Nuwer

J MROCEK, GETTY IMAGES (*faisán*); WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO (*cráneo*)

AGENDA

CONFERENCIAS VIRTUALES

2 de junio
Energía oscura y expansión cósmica
Airam Marcos, Instituto de Física de Cantabria
ifca.unican.es

3, 10, 17 y 24 de junio - Ciclo
Bajo cero
Charlas sobre la Antártida impartidas por expertos en el campo
Centro IDEAL, Universidad Austral de Chile
www.centroideal.cl

11 de junio
Dieta y cáncer: Qué puede y qué no puede hacer la alimentación
Julio Basulto, dietista y nutricionista
Universidad Internacional de Valencia
www.universidadviu.es

12 de junio
Murciélagos y COVID-19: Mitos y realidades
María Cristina MacSwiney, Universidad Veracruzana
www.uv.mx

EXPOSICIONES VIRTUALES

Museo de la Evolución Humana
Visita virtual al museo
mehvirtualtour.es



Paseos matemáticos por Granada
Fundación Descubre
fundaciondescubre.es

Naturaleza artificial: Vuestra exposición
Museo Nacional de Ciencias Naturales
www.mncn.csic.es

OTROS

Del 18 al 20 de junio – Jornadas virtuales
18.ª Feria de la Ciencia
Organizan: Sociedad Andaluza para la Divulgación de la Ciencia y Fundación Descubre
www.feriadelaciencia.org

FÍSICA

Philip Anderson: el eterno legado de un genial cascarrabias

Un gigante de la física del estado sólido que supo llevar su influencia intelectual mucho más allá de su disciplina

MIGUEL Á. VÁZQUEZ-MOZO

Hay ocasiones en que la historia nos obsequia con científicos de tal brillantez y carisma que, en sí mismos, encarnan toda una disciplina. Philip Warren Anderson fue uno de esos raros casos. No solo su liderazgo en física de la materia condensada fue indiscutible durante décadas, sino que su influencia intelectual se extendió también a otros campos. Fallecido el pasado 29 de marzo a los 96 años de edad, con él desaparece uno de los últimos testigos de la edad heroica de la física del estado sólido y uno de los científicos más influyentes del siglo xx en esta área. Pero su legado no acaba ahí. Personaje carismático y singular, Anderson también desempeñó un papel esencial en algunos de los desarrollos clave de la física de partículas del pasado siglo, criticó la desmesurada reverencia que para él despertaba esta disciplina y supo contribuir con inteligencia al debate sobre qué significa que una disciplina científica pueda considerarse fundamental.

Aunque el estudio de las propiedades físicas de los materiales se originó en las últimas décadas del siglo xix, la física del estado sólido empezó a configurarse como disciplina autónoma en los años inmediatamente anteriores a la Segunda Guerra Mundial. Dicha fase fundacional coincidió con los años formativos de Anderson. Tras ingresar en Harvard a la temprana edad de 16 años y realizar allí su doctorado bajo la supervisión de John van Vleck, su situación laboral pareció complicarse. Su matrimonio y el nacimiento de su hija hacían inviable un contrato posdoctoral, al mismo tiempo que su juventud le cerraba las puertas a puestos académicos permanentes. La alternativa era incorporarse a algún laboratorio industrial para trabajar en lo que hoy llamaríamos I+D+i. Tras algunas entrevistas de éxito desigual, aceptó la oferta de los Laboratorios Bell,



Philip Warren Anderson (1923-2020).

DOMINIO PÚBLICO, VIA WIKIMEDIA COMMMONS Y NOBELPRIZE.ORG

en Nueva Jersey, a los que se incorporó en 1949 y donde permaneció hasta 1984, año en que se trasladó a la Universidad de Princeton.

Tras la guerra, los Laboratorios Bell se convirtieron en uno de los principales centros de investigación en la flamante física del estado sólido. Su plantilla incluía entonces a algunos de los nombres más relevantes del campo, como William Shockley, John Bardeen y Charles Kittel. En pocos años Anderson creó el Departamento de Física Teórica, con una estructura similar a la de los departamentos universitarios que incluía a investigadores postdoctorales y científicos visitantes.

Electrones localizados

Durante sus primeros años en los Laboratorios Bell, la atención de Anderson se centró en el estudio del antiferromagnetismo. En 1958 llegó el que se convertiría en uno de sus trabajos más importantes de toda su carrera: aquel en el que introdujo el concepto que hoy conocemos como «localización de Anderson», una idea que con los años ha encontrado multitud de aplicaciones. Por este y otros logros en el campo del magnetismo, Anderson recibiría en 1977 el premio Nobel de física junto con Van Vleck y Sir Neville Mott.

Para entender en qué consiste la localización de Anderson, hemos de recordar primero el origen de la resistencia eléctrica en los conductores. Pensando en términos clásicos, podríamos creer que esta proviene de los choques de los electrones con los iones de la red. Pero la mecánica cuántica nos dice que, a temperatura cero, una red perfectamente regular no impide el movimiento de los electrones. Lo que obstaculiza el paso de la corriente eléctrica son las irregularidades causadas por las impurezas, o «defectos», presentes en la red. En otras palabras, la resistencia eléctrica aparece en realidad como un resultado del desorden.

Lo anterior podría hacernos pensar que, si aumentamos poco a poco el desorden en un conductor, su resistencia eléctrica debería crecer de manera gradual. Pero Anderson encontró algo muy distinto: cuando el desorden alcanza cierto límite, se produce una transición de fase en la que el material se convierte súbitamente en aislante. En ese momento la función de onda de un electrón deja de estar extendida por toda la muestra y pasa a estar localizada en torno a un punto. Los electrones no pueden por tanto alejarse de esas posiciones y dejan de conducir la electricidad. A diferencia de los aislantes tradicionales, que carecen de electrones en la banda de conducción, estos «aislantes de Anderson» sí los poseen, solo que dichos electrones están atrapados y no pueden conducir la electricidad.

Ruptura de simetría

Otro de los grandes desarrollos teóricos de la física de la materia condensada de aquellos años había sido la explicación, en 1957, de la superconductividad a partir de la teoría BCS, así llamada por las iniciales de sus autores, John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer. Sin embargo, un aspecto aparentemente insatisfactorio de dicha teoría era que el estado de mínima energía del superconductor no presentaba cierta propiedad esencial del electromagnetismo, conocida con el nombre técnico de invariancia gauge. Aquel problema comprometía seriamente la coherencia interna de la teoría.

Anderson abordó el rompecabezas y llegó a una solución cuyas implicaciones trascenderían la física del estado sólido. Demostró que aquella falta de invariancia era consecuencia de no haber tenido en cuenta ciertos estados colectivos de los electrones. En un célebre artículo publicado en 1963, explicó dichos estados en términos de un «fotón con masa».

Aquello clarificó la física que se escondía tras la teoría BCS y reveló que, en un material, la superconductividad aparece cuando la invariancia gauge se rompe espontáneamente. Y aquel mecanismo resultó ser el análogo no relativista del fenómeno que, un año después, describieron Robert Brout, François Englert y Peter Higgs en el contexto de la física de partículas y que condujo a la predicción del bosón de Higgs, descubierto en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN en 2012.

Fenómenos emergentes

A pesar de los grandes avances tanto en la física del estado sólido como en otras áreas, la historia de la física en la segunda mitad del siglo xx se ha percibido a menudo como dominada por el ascenso de la física de partículas. El prestigio de este campo creció de forma constante desde los años treinta, y en 1970 atraía no solo a un buen número de los más brillantes estudiantes de doctorado, sino también gran parte del presupuesto público en investigación, una circunstancia motivada por la creciente necesidad de grandes infraestructuras experimentales.

Para una parte considerable de la comunidad científica, el éxito de la física de altas energías suponía una confirmación de su filosofía subyacente: el reduccionismo, la idea de que la multiplicidad de fenómenos que observamos en la naturaleza puede explicarse a partir de un pequeño conjunto de leyes básicas. El objetivo final de la física de partículas sería, por tanto, descubrir las leyes que gobiernan la naturaleza en su nivel «más fundamental».

En 1972, Anderson publicó en la revista *Science* un influyente artículo titulado «Más es diferente» donde justamente criticaba la pretensión de la física de partículas de arrogarse en exclusiva el calificativo de ciencia fundamental. Su tesis era que el reduccionismo se ve limitado por la aparición de fenómenos emergentes, aquellos que surgen cuando interaccionan un gran número de constituyentes básicos (ya sean moléculas o neuronas, por ejemplo) y cuyo comportamiento no pueden deducirse a partir de la simple extrapolación de las leyes que rigen dichos constituyentes. Tales fenómenos emergentes eliminaban cualquier supuesta jerarquía entre las ciencias, pues impedían entender la química como una mera aplicación de la física o la biología como una simple aplicación de la química. Para Anderson, la ruptura de simetría ilustraba la forma en que surgen esas propiedades emergentes.

Influencia pública

Muestra de aquel posicionamiento fue su testimonio en 1987 ante el comité del Congreso de EE.UU. que debía decidir sobre la financiación del Supercolisionador Superconductor (SSC), el gigantesco acelerador de partículas que, de haberse construido, probablemente hubiera adelantado al LHC en el descubrimiento del bosón de Higgs. Allí Anderson se enfrentó a Steven Weinberg, también premio nóbel y vehemente defensor del proyecto. Anderson objetó que su coste bien podría dedicarse a la financiación de otras áreas científicas igualmente interesantes, la física del estado sólido entre ellas.

Fueran o no convincentes sus argumentos, lo cierto es que el SSC acabó cancelándose. Aludiendo a sus trabajos sobre ruptura de simetría, el también recientemente fallecido Murray Gell-Mann, otro de los padres del modelo estándar de la física de partículas, afirmaba —con

innegable malicia— en su libro *El quark y el jaguar* que la actitud de Anderson hacia aquel proyecto quizás hubiera sido otra de haberse tratado de «la búsqueda del bosón de Anderson-Higgs» o incluso del de «Higgs-Anderson».

También en la escena pública, Anderson se manifestó contra la Iniciativa de Defensa Estratégica del Gobierno de Ronald Reagan, conocida popularmente como «guerra de las galaxias». Consideraba el proyecto científicamente inviable y estratégicamente peligroso, y advertía del riesgo de una militarización de ciertas áreas de investigación. El interesante debate que sobre este asunto mantuvo con el entonces secretario de Estado, George Schultz, traspasó las fronteras de EE.UU. y llegó a ser noticia de portada en *Le Monde Diplomatique*.

Personalidad difícil

En un plano humano, no era Anderson una personalidad fácil. Él mismo llegó a calificarse de «cascarrabias» (*curmudgeon*), apreciación que compartían algunos de sus colegas de profesión. Durante décadas sentó cátedra sobre los temas más diversos con sus artículos de opinión en la revista *Physics Today*, sin rehuir nunca la polémica.

A consecuencia de una estancia en Japón, Anderson quedó fascinado por la cultura de ese país, de la que llegó a ser un profundo conocedor. Al respecto, concluiremos con una anécdota que no solo revela su actitud hacia lo japonés, sino también su propia personalidad. En mayo de 1982, *Physics Today* publicó una imagen de Einstein bebiendo sake durante su visita a Kioto en 1922. El pie de foto indicaba erróneamente que se trataba de la ceremonia del té. La respuesta de Anderson fue inmediata: en una áspera carta aparecida en el número de noviembre, reprendía a la revista por su ligereza, señalando la belleza y el carácter cuasirreligioso de esta ceremonia «que los occidentales debemos respetar y disfrutar, si no comprender».

Miguel Á. Vázquez-Mozo *investiga en el Departamento de Física Fundamental de la Universidad de Salamanca.*

PARA SABER MÁS

A career in theoretical physics. Philip W. Anderson. World Scientific, 2004.
More and different: Notes from a thoughtful curmudgeon. Philip W. Anderson, World Scientific 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Philip W. Anderson: El genio hosco de la física de la materia condensada. John Horgan en *IyC*, marzo de 1995.
De la superconductividad al bosón de Higgs. Miguel Á. Vázquez-Mozo en *IyC*, julio de 2014.
¿Cómo deberían ser las teorías de los sistemas complejos? Sophia Kivelson y Steven A. Kivelson en *IyC*, enero de 2019.
El estado sólido y el nuevo mapa de la física. Joseph D. Martin en *IyC*, junio 2019.

BIOLOGÍA REGENERATIVA

A mayor estrés, más canas

El sistema nervioso simpático de los ratones se hiperactiva con el estrés, lo que diezma ciertas células de los folículos pilosos. Como resultado, el pelo encanece

SHAYLA A. CLARK Y CHRISTOPHER D. DEPPMANN

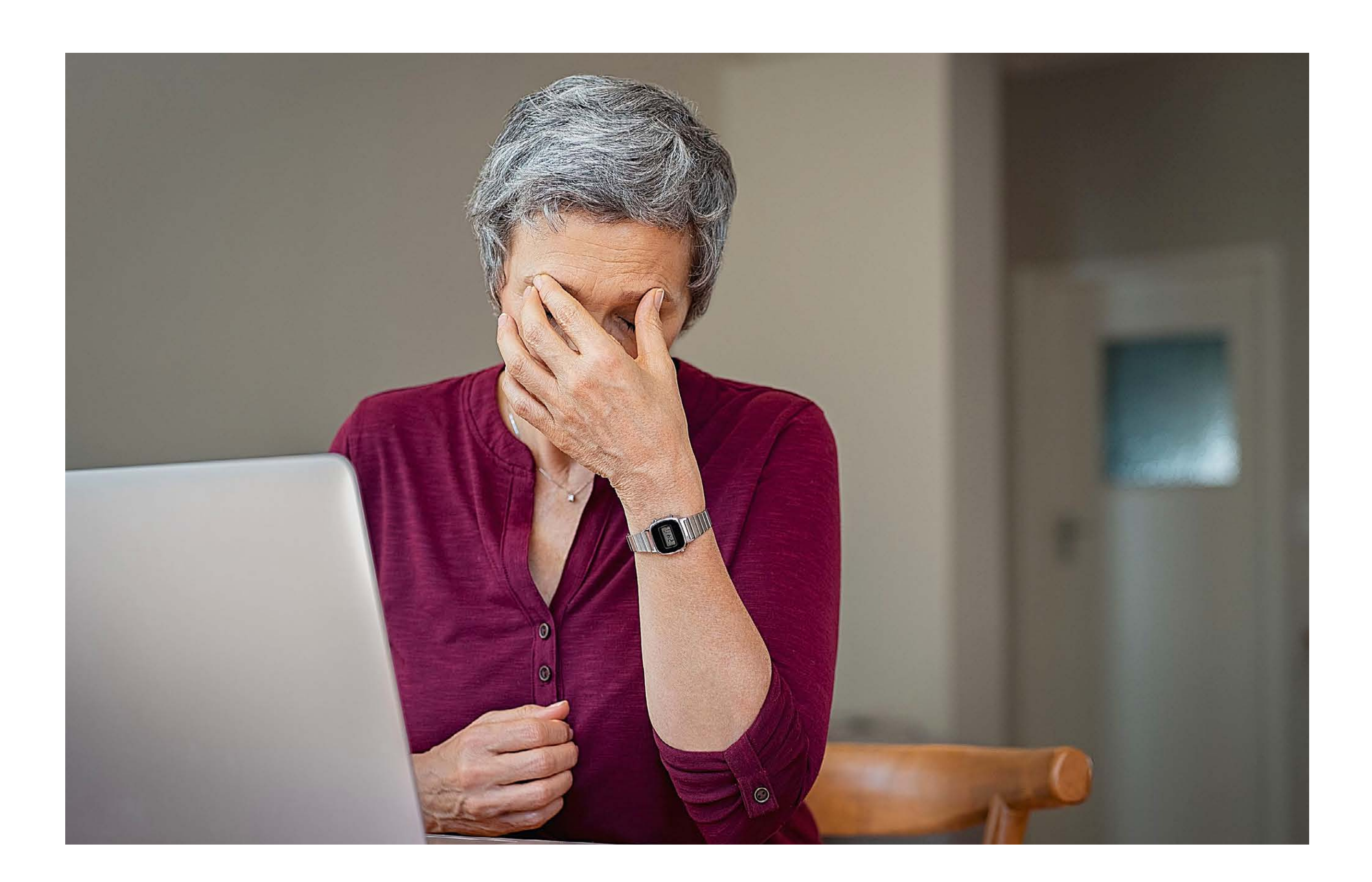
Siempre se ha dicho que el pelo de María Antonieta se tornó completamente blanco la noche anterior a su decapitación. Probablemente sea una historia apócrifa, pero este encanecimiento rápido ha acabado recibiendo el nombre de síndrome de María Antonieta. Se suele dar por hecho que está provocado por el estrés, a tenor de lo que nos ilustran las fotos de los presidentes antes y después de su mandato. Sin embargo, se desconoce la contribución relativa que tienen el envejecimiento, los factores genéticos y el estrés sobre la formación de las canas, en buena parte debido a que la mecánica del proceso está aún por descubrir. Un artículo reciente publicado en *Nature* por investigadores de la Universidad Harvard describe el mecanismo que rige la formación prematura de canas en los ratones sometidos a estrés.

En cualquier cuero cabelludo humano hay unos 100.000 folículos pilosos, con un amplio abanico de tonalidades de cabellos. El color viene determinado por unas células denominadas melanocitos que producen diferentes combinaciones de melanina, un pigmento que absorbe la luz. Los melanocitos proceden de unas células madre denominadas melanocitoblastos, que se sitúan en la protuberancia del folículo piloso. El ciclo normal del pelo se divide en tres etapas: regeneración del folículo piloso (anágena), su degeneración (catágena) y reposo (telógena). Los melanocitos aparecen al principio de la fase anágena. A medida que envejecemos, su reservorio se va agotando poco a poco, lo que hace que el cabello adquiera un aspecto «salpimentado» que, a continuación, se tornará gris para acabar blanco después de perderse por completo el pigmento en todos los folículos pilosos.

Además de la edad, hay otros factores que provocan el encanecimiento prematuro, entre ellos la alimentación deficiente, trastornos como la alopecia aerata o el vitíligo, y el estrés. En el nuevo trabajo, cuyo primer autor es Bing Zhang, los investigadores se dispusieron a comprobar si el estrés intervenía en la formación de canas en los ratones. Para ello, los expusieron, durante cada fase de crecimiento del pelo, a tres situaciones estresantes: dolor, confinamiento y un modelo de estrés psicológico. Cada estado de tensión conllevó el agotamiento de los melanocitoblastos de la región de la protuberancia, con lo que acababan apareciendo parches de pelaje blanquecino.

Hiperactivación del sistema simpático

Las teorías imperantes plantean que detrás del encanecimiento inducido por el estrés están las hormonas (como la corticosterona) o las reacciones autoinmunitarias. El equipo de Harvard examinó estos posibles mecanismos, primero bloqueando la señalización de la corticosterona y luego sometiendo a estrés a animales in-



GETTY IMAGES/RIDOFRANZ/ISTOCK

munodeprimidos. En ambos casos, solo aparecieron canas tras la situación de tensión, lo que indicaba que ni la hormona ni las reacciones autoinmunitarias provocaban la desaparición de los melanocitoblastos. Sin embargo, estas células expresaban el receptor adrenérgico de tipo β_2, que responde a la noradrenalina (un neurotransmisor de la respuesta de lucha o huida en situaciones estresantes), y que, si se perdía, se anulaba el encanecimiento inducido por el estrés.

Los investigadores descubrieron con sorpresa que los ratones a los que habían extraído las glándulas suprarrenales (la principal fuente de noradrenalina circulante) seguían encaneciendo cuando estaban sometidos a estrés.

Otra fuente de noradrenalina es el sistema nervioso simpático (SNS), muy activo en la respuesta al estrés y en la reacción de lucha o huida. Los autores demostraron que las neuronas simpáticas inervaban con profusión la zona de la protuberancia del folículo, y que la extirpación del SNS con una neurotoxina, así como el bloqueo de la liberación de la noradrenalina desde las neuronas simpáticas, impedía la formación de canas inducida por el estrés. A continuación, generaron ratones cuyas neuronas simpáticas podían activarse de repente y hallaron que se formaban canas al hiperactivar su SNS en ausencia de estrés. En conjunto, estos resultados indican que la noradrenalina liberada por las neuronas simpáticas activas desencadena la desaparición de los melanocitoblastos. También cabe resaltar la correlación hallada entre propensión a la formación focalizada de canas y el grado de inervación simpática.

¿Cómo desaparecen los melanocitoblastos de los folículos pilosos debido a la actividad simpática? Estas células madre suelen mantenerse en un estado durmiente hasta que son necesarias para hacer crecer el pelo. Sin embargo, cuando los investigadores les siguieron la pista con una proteína fluorescente, descubrieron que la proliferación y diferenciación de los melanocitoblastos se incrementaba notablemente con un estrés extremo o con la exposición a una concentración elevada de noradrenalina. Esto hacía que los melanocitos abandonaran en masa la protuberancia y que se agotara su población de células madre. Para confirmar aún más este resultado, los investigadores suprimieron la proliferación de los melanocitoblastos con fármacos e ingeniería genética. Con tal intervención se evitó el efecto del estrés sobre la proliferación, la diferenciación y la migración de estas células.

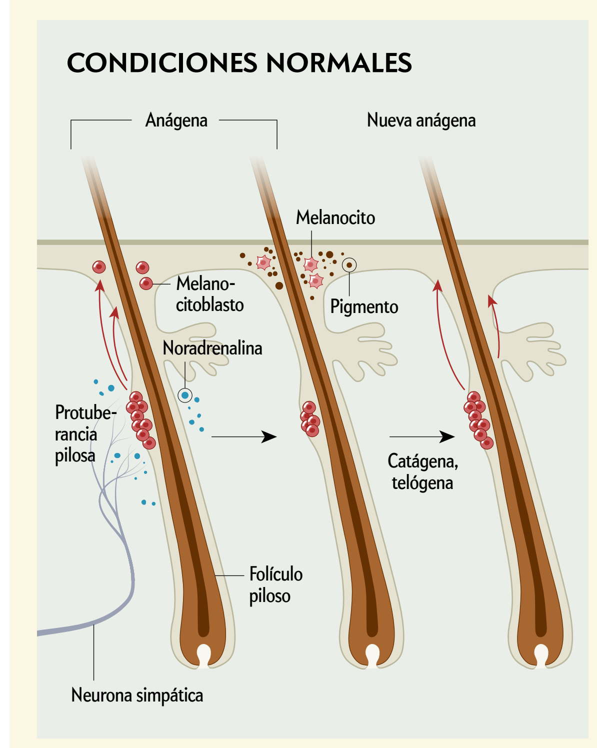
Preguntas abiertas

El nuevo trabajo plantea varias incógnitas. Por ejemplo, el mecanismo por el que se agotan los melanocitoblastos en respuesta al estrés ¿es el mismo que forma las canas al envejecer? Los experimentos futuros en los que se module la actividad del SNS durante más tiempo determinarán si se puede enlentecer o acelerar el encanecimiento por la edad. Quizás, en ausencia de señales del simpático, los melanocitoblastos tengan capacidad de reabastecimiento ilimitado, lo que nos indicaría cómo retrasar la aparición de canas al envejecer.

¿Son otros grupos de células madre igual de vulnerables al estrés si ellas mismas, o las células que forman su nicho, expresan los receptores adrenérgicos de tipo β_2? En apoyo a esta idea, la estimulación del SNS sobre las células del estroma de la médula ósea que rodean los hemocitoblastos (células madre que generan los linajes sanguíneo e inmunitario) los hace abandonar este nicho. Quizás el estrés haga desaparecer los hemocitoblastos, al igual que los melanocitoblastos, lo que podría explicar en parte por qué se dete-

ESTRÉS Y CABELLOS BLANCOS

BAJO CONDICIONES DE ESTRÉS, las señales del sistema nervioso simpático diezman una población de células madre situada en los folículos pilosos de ratones, lo que lleva a la formación de pelos blancos. Abajo se detallan los procesos celulares que se suceden en condiciones normales y bajo estrés.



Las células madre de los melanocitos (melanocitoblastos) se sitúan en la protuberancia del folículo piloso, inervado por las neuronas del sistema nervioso simpático, que liberan el neurotransmisor noradrenalina. El ciclo del folículo piloso pasa por tres fases: regeneración (anágena), degeneración (catágena) y reposo (telógena). Durante la fase anágena los melanocitoblastos migran de la protuberancia (*flechas rojas*) y se diferencian en melanocitos, que sintetizan los pigmentos que dan color al pelo en regeneración. Durante las fases catágena y telógena comienzan a morirse y a abandonar el nicho (*no se muestra*). Sin embargo, quedan muchos melanocitoblastos para reabastecer de melanocitos la siguiente fase anágena.

CONDICIONES DE ESTRÉS

Anágena

Nueva anágena

Catágena, telógena

Se ha demostrado que el estrés activa el sistema nervioso simpático, lo que incrementa la liberación de noradrenalina en los folículos. Esta provoca la conversión de todos los melanocitoblastos en melanocitos, que abandonarán el nicho en las fases catágena y telógena. El folículo piloso se queda así sin melanocitoblastos con los que reponer los melanocitos. Sin ninguna célula pigmentaria que dé color al pelo en la siguiente fase anágena, comenzará a tornarse gris y blanco.

riora la función inmunitaria en respuesta al estrés crónico. Habrá que investigar si este tipo de relación se extiende más allá de los melanocitoblastos y los hemocitoblastos.

Resulta fascinante plantearse qué ventaja evolutiva tendría el encanecimiento inducido por el estrés. Dado que el cabello cano suele estar asociado a la edad, cabe relacionarlo con la experiencia, el liderazgo y la confianza. Por ejemplo, a los gorilas de montaña de lomo plateado (*Gorilla beringei beringei*) macho se les encanece el pelaje de la espalda cuando alcanzan la madurez, lo que podría servirles para liderar el grupo. Quizás un animal que ha soportado suficiente estrés para «ganarse» un pelaje grisáceo ocupe un lugar más elevado en el orden social del que tendría solo por su edad.

La conexión entre el estrés, la situación de peligro, el agotamiento de las células madre y el encanecimiento prematuro está abriendo las puertas a nuevas investigaciones. Más allá del desarrollo de tratamientos contra las canas, el nuevo trabajo está sienta las bases para conocer mejor la influencia del estrés sobre otras reservas de células madre y sus nichos.

Shayla A. Clark
y Christopher D. Deppmann
son miembros del Programa de Graduados en Neurociencia de la Universidad de Virginia, en Charlottesville. Deppmann trabaja además en los departamentos de Biología, Ingeniería Biomédica, Biología Celular y Neurociencia de la mencionada universidad.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 577, págs. 623-624, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Hyperactivation of sympathetic nerves drives depletion of melanocyte stem cells. Bing Zhang et al. en *Nature*, vol. 577, págs. 676-681, enero de 2020.

Chronic variable stress activates hematopoietic stem cells. Timo Heidt et al. en *Nature Medicine*, vol. 20, págs. 754-758, junio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Crecimiento y caída del pelo. Ricki L. Rusting en *IyC*, agosto de 2001.

PALEONTOLOGÍA

Un equipo de paleontólogos asegura haber encontrado ADN de dinosaurio

El descubrimiento, no exento de controversia, plantea la posibilidad de estudiar la genética de los dinosaurios

RILEY BLACK



RECONSTRUCCIÓN DEL LUGAR donde se hallaron los restos fósiles del diminuto dinosaurio *Hypacrosaurus stebingeri*, en Montana (EE.UU.). En el centro se aprecia una cría muerta con la parte posterior del cráneo hundida en aguas poco profundas. Del cartílago del cráneo se han recuperado indicios de ADN.

El fósil de dinosaurio es de lo más humilde. No tiene el tamaño de un fémur de apatosaurio ni impresiona como una mandíbula de tiranosaurio. Se trata de un pequeño fragmento de cartílago craneal de un hadrosáurido denominado *Hypacrosaurus,* una cría que pereció hace más de 70 millones de años. Pero puede que contenga algo jamás rescatado de las profundidades del Mesozoico: restos degradados de su ADN.

En principio, el material genético no dura tanto tiempo, ni muchísimo menos. El ADN comienza a descomponerse cuando el organismo muere. Un estudio de 2012 realizado con huesos de moa (aves no voladoras extintas que habitaban en Nueva Zelanda) señala que el material genético se reduce a la mitad cada 521 años. Si el cálculo es correcto, los paleontólogos únicamente podrían albergar esperanzas de recuperar secuencias reconocibles de ADN de criaturas que hayan muerto, como mucho, hace 6,8 millones de años, pero en esa fecha no entran ni siquiera los últimos dinosaurios no aviares que existieron.

Y aquí entra en escena el cartílago de *Hypacrosaurus*. En un estudio publicado en abril, la paleontóloga Alida Bailleul, de la Academia China de las Ciencias, y sus colaboradores sostienen que, en ese fósil, no solo han encontrado vestigios de proteínas y condrocitos originales, sino un indicio químico compatible con ADN.

Recuperar material genético tan antiguo sería un hito trascendental. Gracias al estudio de criaturas extinguidas hace menos tiempo (como mamuts y megaterios) los paleontólogos han revisado taxonomías, han escrutado la interrelación de diferentes especies y han descubierto algunas variantes fenotípicas, por ejemplo de coloración. El ADN de dinosaurios no aviares añadiría una enorme cantidad de información biológica sobre estos «terribles lagartos». También demostraría que el material genético puede mantenerse detectable no durante un millón de años, sino durante decenas de millones. El registro fósil estaría compuesto por algo más que huesos y huellas: podría contener retazos de las instrucciones genéticas que emparientan a todos los seres vivos sobre la faz de la Tierra.

Pero antes que nada hay que confirmar la autenticidad de estos jirones de presunto ADN prehistórico, cuya calidad, por decirlo de alguna manera, no es precisamente digna de *Parque Jurásico*. En el mejor de los casos, se trata de componentes biológicos degradados (despojos de genes absolutamente ilegibles) y

no de partes intactas de una secuencia, pero, aun así, serían mucho más antiguos (millones de años más) que los siguientes materiales genéticos del registro fósil.

De confirmarse, los hallazgos de Bailleul y su equipo indicarían que los restos bioquímicos de los organismos pueden perdurar decenas de millones de años más de lo que se pensaba. Eso significaría que hay todo un mundo de información biológica al que los expertos apenas se empiezan a asomar. «Creo que ese excelente estado de conservación es más común de lo que suponemos, porque, como investigadores, todavía no hemos analizado suficientes fósiles», explica Bailleul; «tenemos que seguir buscando».

¿Moléculas de dinosaurio o de bacterias?

La pregunta es si estas proteínas y demás restos son realmente lo que parecen. Enseguida después de Bailleul —y movido por la polémica sobre las biomoléculas en huesos de dinosaurio—, un equipo de la Universidad de Princeton, dirigido por el geocientífico Renxing Liang, ha publicado el hallazgo de microbios desconocidos dentro de un hueso de *Centrosaurus,* un ceratópsido de antigüedad equivalente al *Hypacrosaurus*. Los investigadores afirman que obtuvieron ADN del interior del hueso, pero que procedía de estirpes de bacterias y otros microorganismos que no se habían visto hasta entonces. Como el hueso albergaba su microbioma particular, era difícil determinar si las proteínas y el posible material genético en su interior pertenecen al dinosaurio o a las bacterias que lo colonizaron durante el proceso de fosilización.

Al constatarse que estos fósiles pueden alojar poblaciones bacterianas diferentes de las del sedimento circundante, se complica la búsqueda del ADN, las proteínas y otras biomoléculas, ya que los elementos más modernos pueden estar superpuestos sobre los antiguos, generando una imagen falsa. «Aunque se conservase una ínfima cantidad de materia orgánica», explica Liang, «identificarla sería como encontrar una aguja en un pajar, así que podría haber muchas conclusiones erróneas».

«Por ahora, la paleontología molecular suscita muchas dudas», dice Bailleul. Para empezar, cuando se buscan biomoléculas antiguas, se utilizan técnicas concebidas para detectar restos intactos, no degradados ni alterados por el paso de los siglos. Además, los expertos todavía desconocen en muchos aspectos cómo se transforma el tejido orgánico de un hueso de dinosaurio en un fósil mineralizado. «No hemos desentrañado con técnicas químicas todos los complejos mecanismos de la fosilización, ni sabemos lo suficiente sobre la función que desempeñan los microbios», afirma Bailleul. Por ejemplo, no queda claro cómo interactúan los microbios contemporáneos de fuera del hueso con los que residen en su interior.

Esos interrogantes, sumados a los protocolos que siguen en fase de desarrollo, atizan el debate sobre qué representan los fragmentos biológicos encontrados en los huesos de dinosaurio. En el estudio del cartílago de *Hypacrosaurus* se analizaron sus detalles microscópicos y se utilizaron tinciones químicas que se fijan al ADN. En cambio, en el hueso de *Centrosaurus* se aplicó una secuenciación de ADN para dilucidar la naturaleza de los restos genéticos, pero no se analizó su microestructura.

Bailleul recalca la importancia de tener en cuenta microorganismos desconocidos en el estudio microbiológico de los huesos de dinosaurio, pero considera improbable que las bacterias se infiltrasen en células de cartílago e imitasen su núcleo hasta el punto de que los científicos confundan una cosa con la otra. De todas maneras, «nunca se es demasiado escéptico sobre los resultados propios», apunta el paleogenetista y escritor Ross Barnett, que no participó en ninguno de los estudios citados.

Una de las principales dificultades de la actual controversia, explica Barnett, es la falta de replicación, un problema con el que los paleogenetistas ya se habían topado: coincidiendo con el estreno de la película *Parque Jurásico,* allá por 1993, la prensa científica ya proclamaba el descubrimiento de ADN del Mesozoico. Esas afirmaciones se vieron refutadas posteriormente, cuando otros grupos de investigadores no consiguieron reproducir los resultados. Aunque la paleogenética ha evolucionado desde entonces, sigue siendo crucial que distintos laboratorios confirmen el mismo resultado. «Si se pudieran enviar los fósiles del mismo yacimiento a un laboratorio diferente, para que preparasen sus propios anticuerpos, hiciesen la tinción y corroborasen los resultados, todo sería más creíble», argumenta Barnett. Sin embargo, en muchos casos, las noticias de muestras halladas en excepcional estado de conservación no han sido verificadas siguiendo ese procedimiento.

Con todo, en el campo de la paleobiología molecular, están diseñándose protocolos y criterios científicos a medida que siguen buscándose pistas en los recovecos de esos huesos ancestrales. «Espero que también lo estén intentando muchos paleontólogos y biólogos, asegura Bailleul; «conoceremos las respuestas antes si todos aunamos esfuerzos».

Aunque se acabe comprobando que el supuesto material orgánico de dinosaurio no es tal, el trabajo podría reportar beneficios imprevistos. Se cree que las colonias de bacterias intervienen en la conservación de los huesos y su sustitución por minerales, contribuyendo a la fosilización de los restos de dinosaurios. Liang pronostica que, «en el futuro, los estudios sobre ADN de colonias bacterianas que se hubiesen alojado en huesos de dinosaurio podrían arrojar luz sobre la función de los microorganismos en la fosilización y preservación de los huesos a lo largo de las eras geológicas».

«Son preguntas muy difíciles», admite Bailleul, «pero si seguimos intentándolo, tenemos la esperanza de encontrar respuesta para la mayoría». En la situación actual, de momento, no hay nada escrito en piedra.

Riley Black *es escritora científica especializada en evolución, paleontología e historia natural.*

PARA SABER MÁS

The half-life of DNA in bone: measuring decay kinetics in 158 dated fossils. Morten E. Allentoft et al. en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 279, n.º 1748, octubre de 2012.

Genome-centric resolution of novel microbial lineages in an excavated *Centrosaurus* dinosaur fossil bone from the Late Cretaceous of North America. Renxing Liang et al. en *Environmental Microbiome*, vol. 15, artículo n.º 8, marzo de 2020.

Evidence of proteins, chromosomes and chemical markers of DNA in exceptionally preserved dinosaur cartilage. Alida M. Bailleul et al. en *National Science Review*, vol. 7, n.º 4, págs. 815-822, abril de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Viaje molecular al pasado. Raúl Pérez Jiménez, J. Alegre Cebollada y Julio Fernández en *IyC*, octubre de 2011.

Dar vida al ADN fósil. Kevin L. Campbell y Michael Hofreiter en *IyC*, mayo de 2013.

Volved a la vida, por favor. George M. Church en *IyC*, octubre de 2013.



INFORME ESPECIAL

LA CIENCIA ANTE LA COVID-19



RICHARD BORGE

INFORME ESPECIAL

PERSEGUIR A LOS CORONAVIRUS

LA VIRÓLOGA SHI ZHENGLI BUSCA LOS ORÍGENES DEL PRIMER VIRUS DEL SARS Y DE LA COVID-19 EN CUEVAS DE CHINA DONDE ANIDAN MURCIÉLAGOS

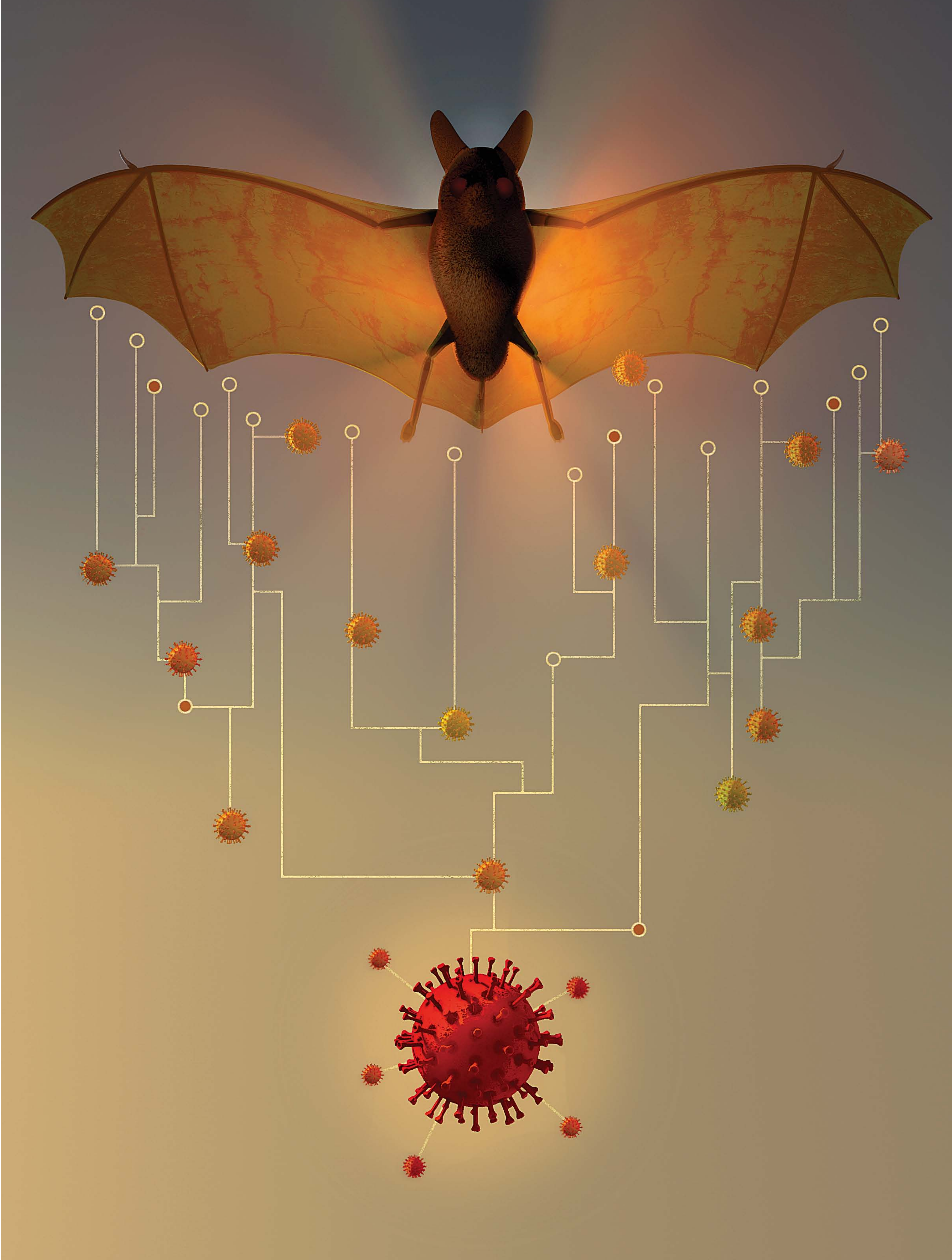
Jane Qiu

EN SÍNTESIS

En 2004, Shi Zhengli descubrió un reservorio natural de coronavirus en cuevas de murciélagos del sur de China.

Los análisis genéticos han demostrado que varias veces han saltado a las personas y han causado enfermedades mortales, como la COVID-19.

El aumento de contactos entre los humanos y los animales silvestres aumenta el riesgo de nuevos brotes epidémicos.



Jane Qiu es periodista científica. Escribe con regularidad para *Nature*, *Science*, *Scientific American* y *The Economist*, entre otras publicaciones, y su trabajo ha sido premiado en numerosas ocasiones.

Las muestras del paciente misterioso llegaron al Instituto de Virología de Wuhan a las 7 de la tarde del 30 de diciembre de 2019. Poco después, sonaba el móvil de Shi Zhengli. Era su jefe, el director del instituto. El Centro para el Control y Prevención de Enfermedades de Wuhan había detectado un nuevo coronavirus en dos pacientes con neumonía atípica ingresados en el hospital y quería que el famoso laboratorio de Shi lo investigara. Si se confirmaba el hallazgo, el nuevo patógeno podría suponer una grave amenaza de salud pública, porque pertenecía a la misma familia de virus que el que causó el síndrome respiratorio agudo grave (SARS, por sus siglas en inglés), una enfermedad que afectó a 8100 personas y mató a casi 800 de ellas entre 2002 y 2003. «Deja todo lo que estés haciendo y dedícate a esto», recuerda Shi que le dijo el director.

Shi, viróloga a la que sus colegas han apodado la «mujer murciélago» (bat woman) de China por sus expediciones en busca de virus en cuevas de murciélagos durante los últimos 16 años, abandonó la conferencia de Shanghái a la que asistía y se subió al primer tren de regreso a Wuhan. «Me preguntaba si [la autoridad sanitaria municipal] lo había entendido mal», dijo. «Nunca pensé que algo como esto pudiera suceder en Wuhan, en el centro de China». Sus estudios habían demostrado que las provincias meridionales y subtropicales de Guangdong, Guangxi y Yunnan eran las que tenían más riesgo de albergar coronavirus que pudieran saltar de los animales a los humanos (especialmente desde los murciélagos, un reservorio conocido). Si los coronavirus fueran los culpables, recuerda haber pensado, «¿podrían proceder de nuestro laboratorio?».

Mientras el equipo de Shi en el instituto de Wuhan, una filial de la Academia China de las Ciencias, se apresuraba a buscar la identidad del patógeno —durante la semana siguiente relacionaron la enfermedad con el nuevo coronavirus, denominado SARS-CoV-2—, la infección se propagó como un incendio incontrolado. Al cierre de este número, en China ya se habían infectado más de 84.000 personas. Alrededor del 80 por ciento vivían en la provincia de Hubei, de la que Wuhan es la capital, y fallecieron más de 4600. Fuera de China, más de 4,7 millones de personas de más de 200 países y territorios se habían contagiado con el virus, y más de 315.000 habían muerto por la enfermedad que este provoca, la COVID-19.

Los científicos llevaban mucho tiempo avisando de que el ritmo de aparición de nuevas enfermedades infecciosas se está acelerando; sobre todo, en los países en vías de desarrollo, con altas densidades de población y de animales que se desplazan y entremezclan cada vez con mayor frecuencia. «Es extremadamente importante localizar el origen de la infección y la cadena de transmisión entre especies», opina el ecólogo de enfermedades Peter Daszak, presidente de EcoHealth Alliance, organización científica sin ánimo de lucro con sede en Nueva York que colabora con expertos, como Shi, de treinta países de Asia, África y Oriente Medio para descubrir nuevos virus en animales silvestres. Otra tarea igualmente importante, añade, consiste en encontrar otros patógenos para «evitar que se repitan incidentes similares».

LAS CUEVAS

Para Shi, la primera expedición en busca de virus fue como irse de vacaciones. En un soleado y agradable día de primavera de 2004, se unió a un equipo internacional de investigadores para recoger muestras en colonias de murciélagos que ocupaban cuevas cercanas a Nanning, la capital de Guangxi. Su primera cueva tenía las características típicas de las de la región: grande, rica en columnas de caliza y, al ser un famoso destino turístico, de fácil acceso. «Resultó fascinante», recuerda Shi. Estalactitas de color blanco lechoso colgaban del techo como carámbanos que relucían gracias a la humedad.

Pero esa atmósfera vacacional pronto se disipó. Muchos murciélagos, incluidas varias especies insectívoras de murciélagos de herradura que abundan en el sur de Asia, anidan en cuevas profundas y estrechas situadas en terrenos escarpados. A menudo guiados por los consejos de aldeanos locales, Shi y sus colaboradores tenían que caminar durante horas para llegar a los lugares apropiados y luego avanzar lentamente a través de grietas en las rocas. Los mamíferos voladores pueden ser muy escurridizos. En una semana frustrante, el equipo exploró más de treinta cuevas y vieron solo una docena de murciélagos.

Estas expediciones estaban destinadas a atrapar al culpable del brote de SARS, la primera epidemia importante del siglo xxi. Un equipo de Hong Kong demostró que unas personas que comerciaban con animales silvestres se habían contagiado con el coronavirus del SARS a partir de civetas (mamíferos parecidos a mangostas que son nativos de las regiones tropicales y subtropicales de Asia y África).

Antes del SARS, el mundo sabía muy poco sobre los coronavirus —se denominan así porque su superficie con protuberancias se asemeja a una corona solar cuando se examina bajo el microscopio, explica Linfa Wang, directora del programa de enfermedades infecciosas emergentes en la Facultad de Medicina Duke-NUS de Singapur—. Los coronavirus eran conocidos sobre todo por causar los típicos resfriados. «La epidemia

de SARS cambió las reglas del juego», explica Wang. Fue la primera aparición de un coronavirus mortal con el potencial de convertirse en pandemia. Ese incidente ayudó a poner en marcha una búsqueda en todo el mundo de virus animales que pudieran saltar a los humanos. Shi fue una de las primeras en participar en esa búsqueda, y tanto Daszak como Wang llevan tiempo siendo sus colaboradores.

Continuaba siendo un misterio cómo se habían contagiado las civetas con el virus del SARS, aunque se conocían dos incidentes previos reveladores: las infecciones por el virus Hendra ocurridas en Australia durante 1994, en las que el patógeno saltó de los caballos a los humanos, y la epidemia de virus Nipah en 1998 en Malasia, en la que el virus saltó de los cerdos a las personas. Wang descubrió que ambas enfermedades las habían causado patógenos procedentes de murciélagos frugívoros. Los caballos y los cerdos solo fueron hospedadores intermedios. Los murciélagos que se vendían en el mercado de Guangdong también contenían trazas de virus del SARS, pero muchos científicos consideraron que se trataba de una contaminación. Wang, sin embargo, pensó que estos animales podían ser la fuente original.

Durante esos primeros meses de 2004 dedicados a «perseguir» virus, siempre que el equipo de Shi localizaba una cueva de murciélagos, colocaba una red en la entrada antes de que anocheciera y esperaba a que las criaturas nocturnas salieran para alimentarse de noche. Una vez que los atrapaban, los investigadores les extraían sangre y muestras de saliva, además de heces, trabajando a menudo hasta altas horas de la madrugada. Después de dormir un poco, regresaban a la cueva a la mañana siguiente para recoger orina y deyecciones.

Pero en ninguna de las muestras hallaron rastro alguno de material genético de los coronavirus. Fue un golpe duro. «Parecía que ocho meses de trabajo intenso se habían ido por el desagüe», explica Shi. «Pensamos que, a lo mejor, los murciélagos no tenían nada que ver con el SARS». Estaban a punto de rendirse cuando un grupo de un laboratorio vecino les entregó un kit de diagnóstico para detectar la presencia de anticuerpos producidos por personas con SARS.

No había garantías de que la prueba funcionara con los anticuerpos de los murciélagos, pero Shi le dio una oportunidad. «¿Qué podíamos perder?», comenta. Los resultados superaron sus expectativas. Las muestras de las tres especies de murciélagos de herradura contenían anticuerpos contra el virus del SARS. «Fue un punto de inflexión para el proyecto», explica Shi. Los investigadores averiguaron que la presencia de coronavirus en los murciélagos era efímera y estacional, pero los anticuerpos podían durar desde semanas a años. El kit de diagnóstico, por tanto, era una herramienta valiosa a la hora de encontrar secuencias del genoma vírico.

El equipo de Shi utilizó la prueba de anticuerpos para acotar la lista de localizaciones y de especies de murciélago que había que perseguir para hallar indicios del genoma. Después de recorrer terrenos montañosos en la mayoría de las provincias chinas, dirigieron su atención a un único lugar: la cueva Shitou, en las afueras de Kunming, la capital de Yunnan, donde pusieron en marcha una recogida intensa de muestras en diferentes estaciones durante cinco años consecutivos.

Los esfuerzos valieron la pena. Los «cazadores» de patógenos descubrieron en murciélagos cientos de coronavirus de una increíble diversidad genética. «La mayoría de ellos eran inocuos», indica Shi. Pero una docena pertenecía al mismo grupo que el virus del SARS. Pueden infectar a células pulmonares humanas en una placa de Petri, provocar enfermedades parecidas al SARS en ratones y no se ven afectados por las vacunas y fármacos que funcionan contra este síndrome en ensayos con animales.

SHUYI ZHANG



1



2

EN 2004, EN EL EXTERIOR DE UNA CUEVA de Guangxi, en China, donde anidan murciélagos, Shi Zhengli libera un murciélago de la fruta después de extraerle una muestra de sangre *(1)*. Un grupo de investigadores en la misma región prepara muestras sanguíneas de estos animales que examinarán posteriormente en busca de virus y otros patógenos *(2)*.

En la cueva de Shitou, donde el minucioso escrutinio ha dado lugar a una biblioteca genética natural de virus presentes en murciélagos, el equipo descubrió una cepa de coronavirus que procedía de murciélagos de herradura y que tenía una secuencia genómica idéntica en un 97 por ciento a la encontrada en las civetas de Guangdong. El hallazgo supuso la culminación de la búsqueda del reservorio natural del coronavirus asociado al SARS que había durado una década.

UNA MEZCLA PELIGROSA

En muchas de las cuevas donde anidan murciélagos en las que Shi tomó muestras, incluida la de Shitou, «la mezcla constante de diferentes virus ofrece grandes oportunidades para que aparezcan nuevos patógenos peligrosos», explica Ralph Baric, virólogo de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Si uno vive cerca de esos crisoles víricos, explica Shi, «no necesita ser un comerciante de animales salvajes para infectarse».

Cerca de la cueva de Shitou, hay muchas aldeas dispersas entre las frondosas laderas de una región conocida por sus rosas, naranjas, nueces y majuelas. En octubre de 2015, el equipo de Shi recogió muestras de sangre de más de 200 residentes en cuatro de esas aldeas. Descubrió que seis personas, es decir, casi el 3 por ciento, portaba anticuerpos contra coronavirus parecidos al del SARS de los murciélagos —aunque ninguno

de ellos había tenido contacto con animales silvestres ni había informado haber padecido ningún síntoma que se asemejara a los del SARS o a los de la neumonía—. Solo uno de ellos había viajado fuera de Yunnan antes de la toma de muestras y todos dijeron que habían visto murciélagos volando en sus aldeas.

Tres años antes, el equipo de Shi había ido a investigar el perfil vírico de un pozo de una mina en el montañoso condado de Mojiang en Yunnan (famoso por su té pu-erh, o té rojo), donde seis mineros sufrieron enfermedades similares a una neumonía y dos de ellos fallecieron. Después de tomar muestras en la cueva durante un año, los investigadores descubrieron un grupo diverso de coronavirus en seis especies de murciélagos. En muchos casos, múltiples cepas víricas habían infectado a un único animal, convirtiéndolo en una fábrica volante de nuevos virus.

«El pozo de la mina apestaba como el infierno», explica Shi, quien, al igual que sus colaboradores, llevaba una mascarilla y ropa protectora. «El guano de murciélago, recubierto de hongos, cubría el suelo de la cueva.» Aunque resultó que fue el hongo el patógeno que enfermó a los mineros, Shi cree que solo hubiese sido cuestión de tiempo que se acabaran contagiando con los coronavirus si la mina no se hubiera cerrado de inmediato.

Varios fenómenos están transformando nuestro planeta: las poblaciones humanas ocupan cada vez más los hábitats silvestres y provocan cambios sin precedentes en el uso de la tierra; la fauna salvaje y el ganado son transportados entre países, y sus productos, a lo largo y ancho del globo; y cada vez hay más viajes tanto domésticos como internacionales. Si se tienen en cuenta todos ellos, las pandemias de nuevas enfermedades son una certidumbre casi matemática. Esa consideración no había permitido conciliar el sueño a Shi y a muchos otros investigadores desde mucho antes de que las misteriosas muestras llegaran al Instituto de Virología de Wuhan en esa tarde de mal agüero del pasado diciembre.



EN LA PROVINCIA CHINA DE YUNNAN, científicos de EcoHealth Alliance, un grupo internacional que investiga enfermedades que puedan saltar de animales a humanos, andan a la caza de patógenos en una cueva donde anidan murciélagos.

ECOHEALTH ALLIANCE

Hace más de un año, el equipo de Shi publicó dos análisis completos sobre coronavirus en *Viruses* y en *Nature Reviews Microbiology*. Basándose en los datos de sus propios estudios (muchos de los cuales fueron publicados en revistas académicas de primer nivel) y en los de otros investigadores, Shi y otros autores advirtieron del riesgo de futuras epidemias de coronavirus portados por murciélagos.

EL PEOR PANORAMA POSIBLE

En el tren de vuelta a Wuhan, el 30 de diciembre del año pasado, Shi y sus colaboradores discutieron sobre cómo analizar de inmediato las muestras de los pacientes. Durante las semanas siguientes, la época más intensa y estresante de su vida, la mujer murciélago de China se dio cuenta de que estaba luchando en una batalla que era la peor de sus pesadillas, aunque fuera una para la que se había estado preparando durante los últimos 16 años. Mediante una técnica llamada reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés), que puede detectar la presencia de un virus al amplificar su material genético, el equipo observó que las muestras de cinco de los siete pacientes contenían secuencias genéticas presentes en todos los coronavirus.

Shi dio instrucciones a su grupo para que repitieran las pruebas y, al mismo tiempo, envió las muestras a otro centro para que secuenciaran todos los genomas víricos. Mientras tanto, analizó frenéticamente los registros de su laboratorio de los últimos años para ver si se había producido algún error en la gestión de los materiales experimentales, especialmente durante su eliminación. Shi respiró aliviada cuando llegaron los resultados: ninguna de las secuencias coincidía con la de los virus que aparecían en las muestras que su equipo había obtenido en las cuevas de los murciélagos. El nuevo coronavirus no procedía de su laboratorio. «Eso me quitó un enorme peso de encima», explica Shi. «No había podido pegar ojo durante días.»

El 7 de enero, el equipo de Wuhan había determinado que el nuevo virus había causado la enfermedad que sufrían esos pacientes. Su conclusión se basaba en los resultados de los análisis de PCR, de la secuenciación completa del genoma, de las pruebas de anticuerpos de las muestras sanguíneas y de la capacidad del virus para infectar las células pulmonares humanas en una placa de Petri. La secuencia del genoma del virus, al que finalmente se le dio el nombre de SARS-CoV-2, era idéntica en un 96 por ciento a la del coronavirus que los investigadores habían identificado en los murciélagos de herradura de Yunnan. Sus resultados aparecieron en un artículo publicado en línea el 3 de febrero en *Nature*. «Está muy claro que los murciélagos, una vez más, son el reservorio natural», explica Daszak, que no participó en el estudio.

Desde entonces, se han publicado más de 3400 secuencias de genoma del virus, las cuales indican que las muestras de distintas partes del mundo parecen «compartir un antepasado común», explica Baric. Los datos también apuntan a una única introducción en los humanos, a la que ha seguido una transmisión entre personas.

Dado que el virus parece bastante estable inicialmente y una gran parte de los individuos infectados muestran síntomas leves, los científicos sospechan que el patógeno ya debía estar circulan-

do desde hacía semanas o incluso meses antes de que los casos graves hicieran saltar la alarma. «Pudieron haberse producido minibrotes, pero los virus o se agotaron o se mantuvieron a un nivel de transmisión bajo antes de causar estragos», indica Baric. La mayoría de los virus presentes en los animales reaparecen periódicamente, añade, por lo que «el brote de Wuhan no es, de ninguna manera, accidental».

MERCADOS DE ANIMALES

Para muchos, los mercados de animales silvestres de la región, en los que se vende un amplio abanico de animales, como murciélagos, civetas, pangolines, tejones y cocodrilos, son un crisol perfecto de virus. Aunque los humanos podrían haberse contagiado con el virus mortal directamente de los murciélagos (según varios estudios, incluidos los de Shi y sus colaboradores), varios equipos independientes han propuesto que los pangolines pueden haber sido un hospedador intermedio. Estos equipos han descubierto repetidas veces coronavirus parecidos al SARS-CoV-2 en pangolines atrapados en operaciones contra el contrabando de animales en el sur de China.

El 24 de febrero, China anunció la prohibición permanente de consumir y comerciar con animales silvestres excepto para la investigación científica, el uso médico o la exhibición, lo que acabará con una industria que tiene un valor de 76.000 millones de dólares y que dejará sin trabajo a 14 millones de personas, según un informe de 2017 encargado por la Academia China de Ingeniería. Algunos lo vieron con buenos ojos, pero otros, como Daszak, están preocupados por el hecho de que una prohibición total pueda, simplemente, llevar a la clandestinidad el negocio si no hay un esfuerzo por cambiar las creencias tradicionales o por proporcionar un medio de vida alternativo. «El consumo de animales silvestres ha formado parte de la tradición cultural» de China desde hace miles de años, explica Daszak. «Eso no cambiará de un día para otro.»

En cualquier caso, «el comercio y el consumo de animales salvajes constituyen tan solo una parte del problema», comenta Shi. A finales de 2016, los cerdos de cuatro granjas del condado de Qingyuan en Guandgdong (a 96 kilómetros del lugar en el que se originó el brote de SARS) sufrieron vómitos y diarreas graves, y casi 25.000 de esos animales murieron. Los veterinarios locales no lograron detectar ningún patógeno conocido y llamaron a Shi para que les echase una mano. La causa de la enfermedad, el síndrome de diarrea aguda porcina (SADS, por sus siglas en inglés), resultó ser provocada por un virus cuya secuencia del genoma era un 98 por ciento idéntica a la del coronavirus encontrado en los murciélagos de herradura de una cueva cercana.

«Es un motivo serio de preocupación», indica Gregory Gray, epidemiólogo especializado en enfermedades infecciosas de la Universidad Duke. Los cerdos y los humanos poseen sistemas inmunitarios muy parecidos, lo que facilita que los virus salten de una especie a otra. Además, un equipo de la Universidad de Zhejiang, en la ciudad china de Hangzhou, descubrió que el virus SADS podía infectar a células de numerosos organismos en una placa de Petri, entre ellos, ratones, gallinas, primates no humanos y humanos. Dada la cantidad de granjas porcinas que existen en muchos países, como en China y en Estados Unidos, explica Gray, nuestra máxima prioridad debería ser buscar un nuevo coronavirus en los cerdos.

La epidemia es la séptima causada por virus presentes en murciélagos en las tres últimas décadas, después de la del Hendra en 1994, la del Nipah en 1998, la del de Marburgo en 1999 (y varios episodios posteriores), la del SARS en 2002, la del MERS (síndrome respiratorio de Oriente Medio) en 2012 y la del Ébola en 2014. Pero «los animales [en sí mismos] no son el problema», indica Wang. De hecho, los murciélagos fomentan la biodiversidad y la salud del ecosistema al comer insectos y polinizar las plantas. «El problema es cuando entramos en contacto con ellos.»

PREVENCIÓN

Cuando hablé con Shi el pasado febrero, dos meses después del inicio de la epidemia y un mes después de que el Gobierno impusiera severas restricciones de movimiento en Wuhan (una megaciudad de 11 millones de habitantes), ella dijo, riendo, que la vida parecía casi normal. «Puede que nos estemos acostumbrando a la situación. Sin duda, los peores días ya han pasado.» Los miembros del instituto tenían un pase especial para ir de su casa al laboratorio, pero no podían desplazarse a ningún otro sitio. Tenían que subsistir a base de fideos instantáneos durante las largas jornadas de trabajo porque el bar del instituto estaba cerrado.

Siguen apareciendo revelaciones sobre el nuevo coronavirus. Los investigadores descubrieron, por ejemplo, que el patógeno entra en las células pulmonares humanas utilizando un receptor llamado enzima convertidora de angiotensina 2, y tanto ellos como otros grupos han estado probando fármacos que puedan bloquearla. Los científicos también están intentando desarrollar vacunas a toda prisa. A la larga, el equipo de Wuhan planea desarrollar vacunas y fármacos de amplio espectro contra los coronavirus considerados peligrosos para los humanos. «La epidemia de Wuhan es una llamada de atención», apunta Shi.

Muchos científicos opinan que el mundo debería hacer algo más que responder a los patógenos mortales cuando aparecen. «La mejor manera de proceder es la prevención», indica Daszak. Dado que el 70 por ciento de las enfermedades infecciosas emergentes de origen animal proceden de la fauna silvestre, nuestra máxima prioridad debería ser identificarlas y desarrollar mejores pruebas de diagnóstico, añade. Hacerlo significará continuar en una escala mucho mayor lo que investigadores como Daszak y Shi han estado haciendo antes de que sus proyectos se quedaran sin fondos este año.

Esos esfuerzos deberían centrase en los grupos víricos de alto riesgo presentes en mamíferos propensos a las infecciones por coronavirus, como murciélagos, roedores, tejones, civetas, pangolines y primates no humanos, explica Daszak. Añade que los países tropicales en vías de desarrollo en los que la diversidad de vida silvestre es enorme deberían ser la primera línea en esta guerra contra los virus.

Daszak y sus colaboradores han analizado unas 500 enfermedades infecciosas humanas del pasado siglo. Descubrieron que

«La mezcla constante de diferentes virus ofrece grandes oportunidades para que aparezcan nuevos patógenos peligrosos»
—Ralph Baric, *Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill*

la aparición de nuevos patógenos suele ocurrir en lugares en los que una densa población ha estado cambiando el paisaje, con la construcción de carreteras y minas, la tala de bosques y la intensificación de la agricultura. «China no es la única zona conflictiva», y añade que otras economías emergentes importantes, como India, Nigeria y Brasil, también son zonas de gran riesgo.

Cuando los posibles patógenos hayan sido localizados, los científicos y los funcionarios de salud pública podrán comprobar con cierta regularidad si producen infecciones; para ello deberán analizar muestras de sangre y frotis del ganado, de los animales silvestres que se crían en granjas y con los que se comercia y de poblaciones humanas de alto riesgo, como granjeros, mineros, aldeanos que viven cerca de murciélagos y gente que caza o maneja animales salvajes, explica Gray. Este enfoque, conocido como «Una sola salud», intenta integrar la gestión sanitaria de los animales salvajes, el ganado y las personas. «Solo entonces podremos detectar un brote antes de que se convierta en epidemia», apunta, y añade que la estrategia podría salvar los cientos de miles de millones de dólares que puede costar una epidemia.

De nuevo en Wuhan, donde el aislamiento se levantó el 8 de abril, la mujer murciélago de China no está para celebraciones. Se siente angustiada porque tanto en Internet como en los principales medios de comunicación han sugerido repetidamente que el SARS-CoV-2 saltó accidentalmente de su laboratorio, a pesar de que la secuencia genética del virus no coincide con ninguna de las que estudiaban allí. Otros científicos han descartado rápidamente esa acusación. «Shi dirige un laboratorio de primera categoría mundial que cuenta con los más altos estándares», explica Daszak.

A pesar del enfado, Shi está decidida a continuar con su trabajo. «La misión debe seguir. Lo que hemos descubierto es solo la punta de un iceberg», comenta. Está planeando dirigir un proyecto nacional para analizar sistemáticamente virus presentes en las cuevas de murciélagos, con un ámbito mucho más amplio y con mucha más intensidad que los intentos anteriores. El equipo de Daszak ha calculado que, en los murciélagos, hay más de 5000 cepas de coronavirus esperando a ser descubiertas.

«Los coronavirus presentes en los murciélagos provocarán más brotes», indica Shi, con un tono de inquietante certeza. «Debemos encontrarlos antes de que ellos nos encuentren a nosotros.» IyC

PARA SABER MÁS

Bat coronaviruses in China. Yi Fan et al. en *Viruses*, vol. 11, artículo n.º 210, marzo de 2019.
Origin and evolution of pathogenic coronaviruses. Jie Cui, Fang Li y Zheng-Li Shi en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 17, págs. 181-192, marzo de 2019.
A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin. Peng Zhou et al. en *Nature*, vol. 579, págs. 270-273, marzo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Prevención de pandemias. Nathan Wolfe en *IyC*, junio de 2009.
Cómo evitar una nueva epidemia. Nicholas A. Robinson y Christian Walzer en *IyC*, mayo de 2020.

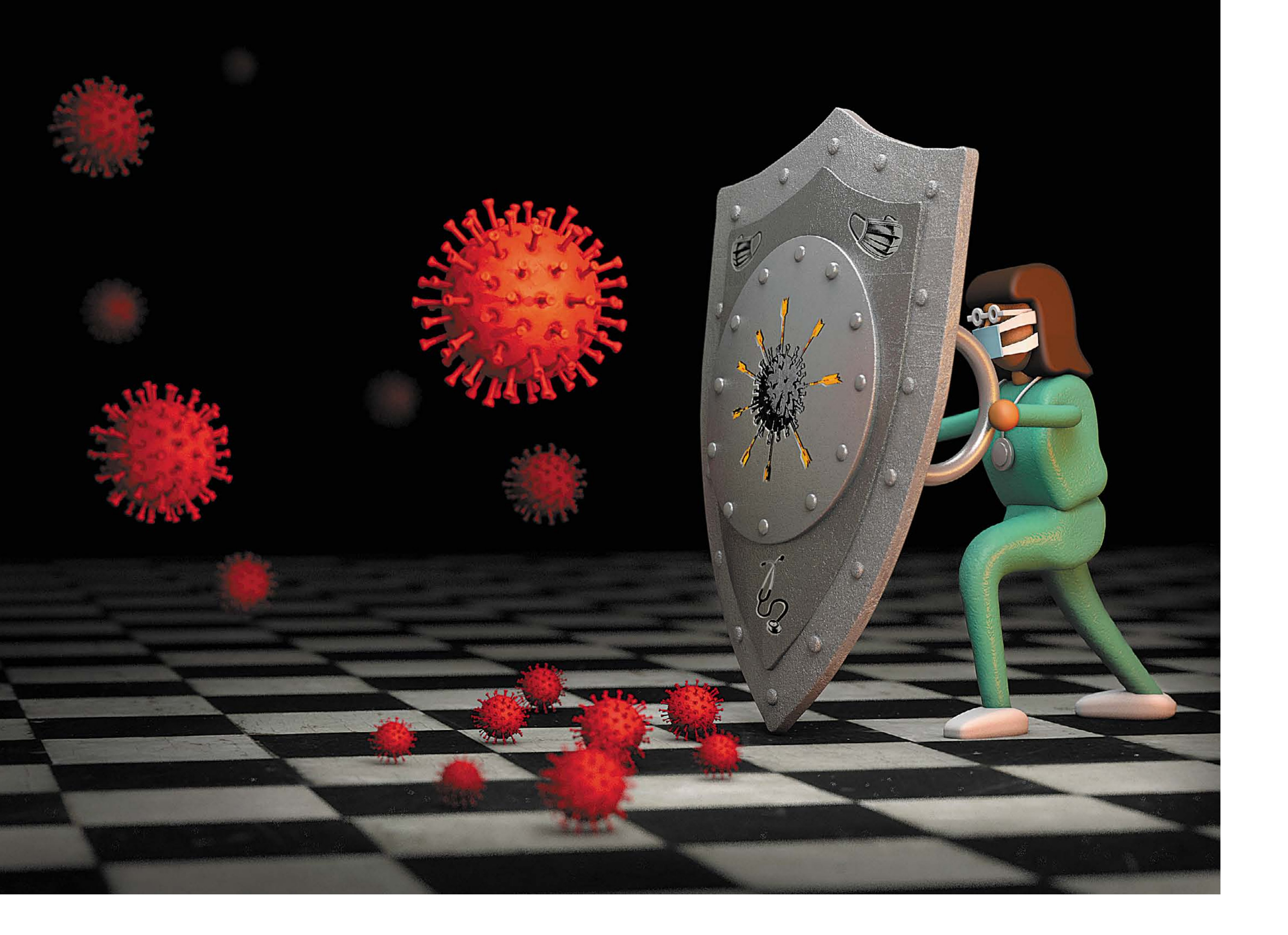
INFORME ESPECIAL

MEDICAMENTOS POR LA VÍA RÁPIDA

SIN TIEMPO PARA OBTENER TRATAMIENTOS PARA LA COVID-19 DESDE CERO, LOS INVESTIGADORES BUSCAN COMPUESTOS YA EXISTENTES QUE FRENEN EL DAÑO

Michael Waldholz

Mark Denison comenzó a buscar un medicamento para tratar la COVID-19 casi una década antes de que esta enfermedad infecciosa, causada por un nuevo coronavirus, asolara el mundo este año. Denison no es profeta, sino virólogo y experto en la familia de los coronavirus, a menudo mortales y responsables de las epidemias de SARS en 2002 y de MERS en 2012. Es un grupo numeroso de virus y «estábamos bastante seguros de que pronto surgiría otro», comenta Denison, que dirige el servicio de enfermedades infecciosas pediátricas en el Centro Médico de la Universidad de Vanderbilt.



Un virus es una criatura extraordinaria. En esencia, es un conjunto de material genético que se las ingenia para incorporarse en una célula y tomar el mando de algunos de sus mecanismos moleculares para fabricar copias de sí mismo. Este ejército de clones hace estallar la célula, destruyéndola, y pasa a infectar a las células cercanas. Los virus son difíciles de eliminar por completo porque se integran en las células, es decir, se esconden dentro de sus hospedadores. Y sus tasas de reproducción son explosivas. Así pues, en lugar de perseguir una ardua erradicación total, los fármacos antivíricos pretenden reducir la replicación a niveles que no dañen el organismo.

En 2013, Denison y Ralph Baric, que investiga esta familia vírica en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, descubrieron un sitio vulnerable en una proteína común a todos los coronavirus que habían examinado, un punto clave para su capacidad replicativa. Obstaculizada esta, el coronavirus no podría causar una infección generalizada. Cuatro años después, científicos de ambos laboratorios localizaron un compuesto que actuaba en ese lugar de la proteína. Se encontraba, sin uso alguno, en una gran colección de compuestos antivíricos creada por el gigante biotecnológico Gilead Biosciences. Obtuvieron una muestra del fármaco, llamado remdesivir, y comprobaron en experimentos en el tubo de ensayo y con animales que detenía la maquinaria de replicación de algunas variantes de coronavirus.

Entonces, a principios de enero, cuando sonaron las alarmas sobre el SARS-CoV-2, Denison y Baric alertaron a sus colegas de Gilead de que tenían en su poder un posible tratamiento. En buena medida por la actividad del remdesivir contra otras cepas de coronavirus en los estudios con animales de Denison y Baric, en enero se administró de manera excepcional a pacientes (uso compasivo). En marzo, Gilead se apresuró a poner en marcha dos ensayos en humanos para examinar la seguridad del medicamento y hallar las dosis más eficaces en unos 1000 enfermos a lo largo de varios meses; las autoridades sanitarias chinas iniciaron dos estudios clínicos similares. Entre tanto, Denison, Baric y un grupo de la Universidad Emory descubrieron otro compuesto, el EIDD-2801, que actúa sobre la misma vulnerabilidad vírica. A principios de abril, publicaron sus resultados en ratones, que mostraron una mejoría de la capacidad respiratoria y una reducción de la cantidad de numerosos coronavirus. En los experimentos de laboratorio con células pulmonares humanas, el nuevo producto frenó drásticamente el SARS-CoV-2.

A raíz de las epidemias de SARS y MERS, varios laboratorios de todo el mundo, como los de Denison y Baric, habían acumu-

EN SÍNTESIS

Los desarrolladores de fármacos están trabajando en tres estrategias para tratar la COVID-19, la enfermedad causada por el nuevo coronavirus.

Una manera es impedir que el SARS-CoV-2 penetre en la célula; otra consiste en frenar la actividad reproductiva del virus, si llega a penetrar.

Por último, los investigadores persiguen detener la hiperreacción del sistema inmunitario, que es responsable de los síntomas más graves.

TRES FORMAS DE TRATAR LA COVID-19

Algunos de los medicamentos que se están desarrollando para hacer frente a la enfermedad

Bloquear la replicación del virus

FÁRMACO	ACCIÓN	EMPRESA/LABORATORIO	SITUACIÓN
Remdesivir	Altera la síntesis del ARN vírico	• U. de Carolina del Norte • Universidad de Vanderbilt • Gilead Sciences	Ensayos clínicos
EIDD-2801	Altera la síntesis del ARN vírico	• Universidad de Emory • U. de Carolina del Norte • Universidad de Vanderbilt • Ridgeback Biotherapeutics	Ensayos clínicos
Danoprevir-Ritonavir	Inhibe la proteasa (enzima) vírica	• Ascletis Pharma	Ensayos clínicos
Compuestos experimentales de ARNi	Bloquean la síntesis de ARN vírico	• Alnylam Pharmaceuticals • Vir Biotechnology	Investigación inicial

Impedir la entrada en las células

FÁRMACO	ACCIÓN	EMPRESA/LABORATORIO	SITUACIÓN
APN01	Señuelo del receptor de la célula	• Apeiron Biologics	Ensayos clínicos
Cóctel de múltiples anticuerpos humanos	Anticuerpos que neutralizan el virus	• Regeneron	Ensayos clínicos previstos para el verano
Anticuerpos monoclonales con potencial terapéutico	Anticuerpos que neutralizan el virus	• Vir Biotechnology • Biogen • WuXi Biologics	Ensayos clínicos previstos
TAK-888	Anticuerpos modificados contra el virus	• Takeda	Fase preclínica

Reducir la hiperreacción del sistema inmunitario y la dificultad respiratoria aguda

FÁRMACO	ACCIÓN	EMPRESA/LABORATORIO	SITUACIÓN
Kevzara (sarilumab)	Anticuerpos que bloquean la señal de IL-6 en las células inmunitarias	• Regeneron • Sanofi	Ensayos clínicos
Actemra (tocilizumab)	Anticuerpos que bloquean la señal de IL-6 en las células inmunitarias	• Genentech • BARDA*	Ensayos clínicos
Remestemcel-L	Células madre que modulan el sistema inmunitario	• Mesoblast • NIH†	Ensayos clínicos
Xeljanz (tofacitinib)	Inhibe las células inflamatorias	• Pfizer	Ensayos clínicos

* Autoridad Biomédica de Investigación y Desarrollo Avanzado de Estados Unidos
† Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos

Michael Waldholz, periodista especializado en salud, dirigió un equipo de reporteros que ganó el premio Pulitzer en 1997 por su cobertura del sida.

lado años de experiencia escrutando el funcionamiento interno de los coronavirus. En el momento en que se describieron la secuencia genética y la estructura del nuevo coronavirus, ya se conocían las enzimas y las proteínas que permiten a la mayoría de los coronavirus propagarse de una célula humana infectada a otra, y también se sabía que el organismo podía desencadenar una respuesta inflamatoria demasiado violenta ante su llegada a las células de las vías respiratorias pulmonares.

Fruto de ese trabajo, los laboratorios que ahora se centran en la presente amenaza cuentan con tres estrategias principales para frenar al virus. La primera consiste en encontrar compuestos, como el remdesivir y el EIDD-2801, que obstaculicen el mecanismo reproductivo del virus dentro de la célula infectada. La segunda estriba en impedir desde el principio la entrada del virus en las células, como un portero de discoteca, y evitar que se infecten. La tercera estrategia persigue amortiguar la peligrosa respuesta hiperactiva del sistema inmunitario, una «tormenta de citocinas» capaz de asfixiar al enfermo en una acumulación masiva de secreciones y células respiratorias moribundas.

En busca de estos medicamentos, los investigadores han recurrido a la lista de compuestos de uso humano aprobados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de Estados Unidos, alrededor de 20.000, y han escudriñado las solicitudes de patentes de medicamentos para sacar a la luz compuestos con mecanismos de acción prometedores. Se desea encontrar fármacos desarrollados al menos parcialmente para ahorrarse los años que supone elaborar moléculas terapéuticas desde cero. El Instituto Milken, una fundación de análisis en defensa de la salud, contó a mediados de abril 133 tratamientos experimentales para la COVID-19. Se están preparando con urgencia ensayos clínicos para 49 de estas terapias. [En España, numerosos centros las examinan también, como el Hospital Clínico y el Instituto de Salud Global de Barcelona, que participan en un ensayo sobre el remdesivir]. Aún no se conoce su eficacia en las personas y los científicos advierten que es improbable que estos medicamentos, como otros antivíricos, sean curativos. Pero podrían reducir los síntomas lo suficiente como para dar al sistema inmunitario de los enfermos la oportunidad de vencer al virus por su cuenta.

BLOQUEADORES DE LA REPLICACIÓN

Todos los coronavirus se sirven del mismo mecanismo molecular para reproducirse, en el que interviene una enzima denominada ARN polimerasa vírica, por lo que Baric comenta que ese mecanismo era un objetivo obvio. La polimerasa comete muchos errores durante la replicación del virus, y depende de otra enzima, conocida como exonucleasa, para corregirlos. El remdesivir parece desactivar la enzima correctora. Como consecuencia, la fábrica de copiado se deteriora y produce menos virus nuevos.

El EIDD-2801, compuesto cuyos resultados prometedores en el tubo de ensayo y en animales se publicaron a principios de abril, actúa sobre la misma enzima vírica. A diferencia del remdesivir, que se administra por vía intravenosa, el EIDD-2801 puede tomarse en comprimidos. Por ello, Baric y otros científicos que estudian este compuesto, entre ellos George Painter, profesor de farmacología y presidente del Instituto Emory para el Desarrollo de Medicamentos (que creó el producto) suponen que su uso acabará por extenderse más que el del remdesivir.



LAS PARTÍCULAS del virus SARS-CoV-2 (*círculos rojos*) salen de una célula para diseminar la infección, a menos que los fabricantes de medicamentos encuentren formas de cerrarles el paso.

NIAID-RML

En 2018, mientras buscaban un medicamento universal contra la gripe, Painter y sus colaboradores descubrieron la actividad del EIDD-2801. Al aparecer el SARS-CoV-2, el grupo de Painter cambió de objetivo de inmediato. El EIDD-2801, igual que el remdesivir, inhibe las actividades de autocopiado del coronavirus, pero también actúa contra variantes del virus con una mutación que las hace resistentes al fármaco de Gilead. Además, el EIDD-2801 es eficaz frente a multitud de otros virus de ARN, lo que podría convertirlo en un antivírico polivalente, del mismo modo que algunos antibióticos son activos contra una gran variedad de bacterias. En el caso de la COVID-19, explica Wayne Holman, cofundador de Ridgeback Biotherapeutics (la empresa con sede en Miami titular de la licencia del medicamento y para el que está planificando ensayos clínicos), el objetivo es tener un comprimido que los pacientes puedan tomar en casa en la fase inicial de la enfermedad para evitar que progrese.

CERRAR EL PASO A LA INFECCIÓN

Para impedir que el SARS-CoV-2 penetre en las células desde el principio, los científicos están tratando de crear anticuerpos que se fijen a la proteína del virus, llamada espiga (o S, de *spike* en inglés), que abre la entrada a la célula. Algunos de estos anticuerpos neutralizantes, compuestos de inmunoglobulinas (un tipo de proteínas), pueden provenir de la sangre de pacientes que ya han eliminado el virus. Varios centros médicos, como el Hospital Johns Hopkins y la Clínica Mayo, están recogiendo plasma sanguíneo de supervivientes para analizar los anticuerpos. Los médicos lo transfunden después a enfermos hospitalizados con dificultad respiratoria aguda potencialmente mortal, en lo que se conoce como tratamiento con plasma de convaleciente. Los primeros estudios con un pequeño número de estos pacientes hacen pensar que el método puede funcionar, ya que en algunos casos mejoraron los síntomas y disminuyeron los niveles del virus, pero los trabajos se encuentran aún en sus etapas preliminares.

La empresa biofarmacéutica japonesa Takeda Pharmaceuticals también recoge plasma de afectados por COVID-19 ya recuperados para detectar anticuerpos. Busca los anticuerpos del plasma que muestren la mayor actividad contra el SARS-CoV-2, para que sirvan de plantilla a fin de sintetizar una serie de versiones aún más activas y crear un potente cóctel de inhibidores de infecciones, informa Chris Morabito, director de investigación y desarrollo de tratamientos derivados del plasma. La terapia, denominada TAK-888, podría iniciar la fase de ensayos clínicos a finales de año, señala Morabito; el número 888 significa «triple fortuna» en chino. Otros fabricantes de medicamentos, como Regeneron y Vir Biotechnology, están generando sus propios anticuerpos terapéuticos, que también pretenden evaluar en pacientes este año.

Otra estrategia de bloqueo centra la atención en el sitio de acoplamiento celular que emplea el virus. Josef Penninger, biólogo molecular de la Universidad de la Columbia Británica, en Vancouver, y fundador de la empresa farmacéutica Apeiron Biologics, trata de alejar al virus del receptor químico ACE2, situado en la pared externa de las células pulmonares. La proteína S del coronavirus se une a este receptor. Hace varios años, el grupo de Penninger sintetizó una versión señuelo del ACE2. En el tubo de ensayo, observó que la molécula sintética, APN01, atraía a los coronavirus y los apartaba de las verdaderas células respiratorias humanas. El virus se acoplaba al señuelo y quedaba inmovilizado. «Cerramos la puerta al virus y, al mismo tiempo, protegemos los tejidos», asegura Penninger. Apeiron tiene previsto emprender este mismo año ensayos clínicos con APN01, que debe administrarse mediante infusión a enfermos hospitalizados.

HIPERREACCIÓN

En los enfermos más graves de COVID-19, los pulmones acumulan gran cantidad de líquido mucoso que impide a las células absorber oxígeno. Estos pacientes precisan respirador. La acumulación de líquido se debe a una respuesta inmunitaria hiperactiva en la que interviene la interleucina 6 (IL-6), una sustancia transmisora de señales. Empresas biotecnológicas, como Regeneron y Genentech, han fabricado anticuerpos sintéticos que se unen a la IL-6 y silencian la llamada de alerta que emite.

Northwell Health, una gran red de 23 hospitales con sede en Long Island, Nueva York, es uno de los más de una docena de centros que participan en los ensayos clínicos de bloqueadores de IL-6, refiere Kevin Tracey, director ejecutivo de los Institutos Feinstein de Investigación Médica y que gestiona los estudios en los centros de Northwell. «Los hospitales se ven desbordados por enfermos muy graves con neumonía y dificultad respiratoria aguda», añade. «El mecanismo de acción de los fármacos anti-IL-6 es verosímil. Tengo esperanzas de que funcionen.»

Ninguna de estas estrategias es curativa. Según Denison, los medicamentos en fase de desarrollo pueden «reducir la gravedad» de un episodio avanzado de COVID-19, sobre todo si se administran cuando aparecen los primeros síntomas (tos leve, dolor muscular o fiebre ligera). En un futuro esperanzador, la asociación de varios tratamientos podría atacar al virus por distintos frentes, igual que un cóctel de antivíricos es capaz de contrarrestar la infección por VIH. Al reducir los síntomas, estos medicamentos lograrían evitar la hospitalización de ciertos pacientes y permitirían prescindir del respirador a los enfermos ingresados. Pueden servir para sostener la supervivencia mientras otros científicos trabajan a contrarreloj para obtener el verdadero aniquilador del virus: la vacuna.

PARA SABER MÁS

An orally bioavailable broad-spectrum antiviral inhibits SARS-CoV-2 in human airway epithelial cell cultures and multiple coronaviruses in mice. Timothy P. Sheahan et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 12, n.° 541, eabb5883, abril de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

La carrera contrarreloj frente al nuevo coronavirus. Marta Consuegra Fernández en *IyC*, abril de 2020.

INFORME ESPECIAL

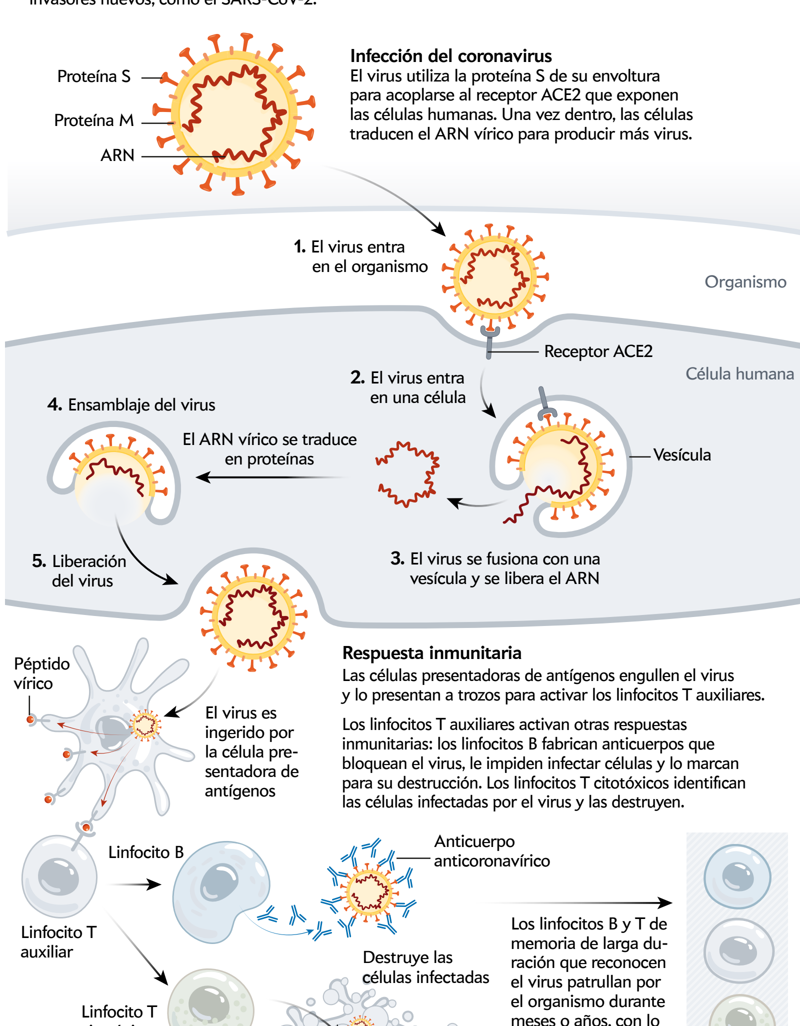
OCHO ESTRATEGIAS PARA OBTENER UNA VACUNA CONTRA EL NUEVO CORONAVIRUS

Ewen Callaway

Equipos de investigación de todo el mundo están desarrollando más de 90 vacunas contra el SARS-CoV-2. Se están probando varios métodos, algunos de los cuales nunca se habían comercializado. Al menos seis grupos ya están inyectando las formulaciones en voluntarios para estudiar los efectos secundarios, mientras que otros acaban de arrancar las pruebas con animales. Esta guía gráfica explica en qué consiste cada tipo de vacuna

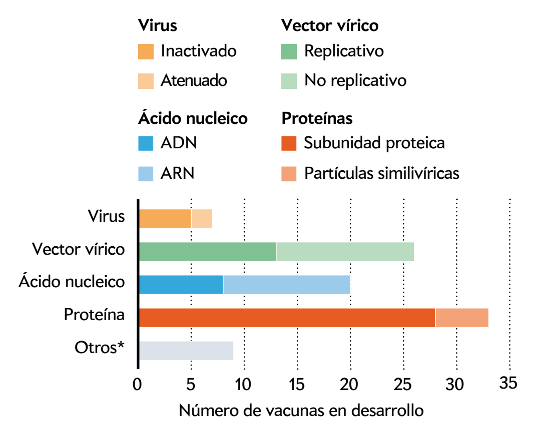
CÓMO DESARROLLAMOS LA INMUNIDAD

El sistema inmunitario adaptativo aprende a reconocer los patógenos invasores nuevos, como el SARS-CoV-2.



TIPOS DE VACUNAS INVESTIGADAS

Todas las vacunas persiguen la exposición a un antígeno que no provoque ninguna enfermedad, sino una respuesta inmunitaria que bloquee o destruya el virus ante cualquier intento de infección. Se están probando al menos ocho tipos de vacunas anticoronavíricas elaboradas con diferentes virus o con partes del SARS-CoV-2.



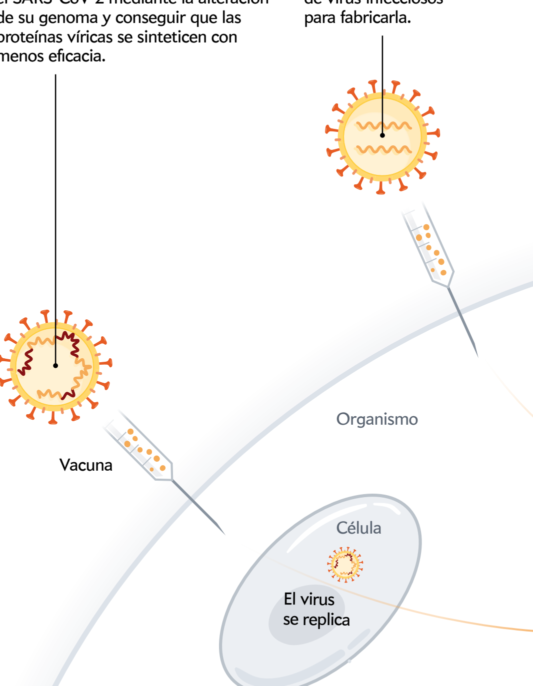
* También se está estudiando si las vacunas antipoliomielítica o antituberculosa actuales podrían ayudarnos a luchar contra el SARS-CoV-2 al desencadenar una respuesta inmunitaria general (en vez de una inmunidad adaptativa específica), o si se podrían modificar genéticamente ciertas células inmunitarias para que actuaran contra el virus.

VACUNAS CON VIRUS

Al menos siete equipos están desarrollando vacunas con el propio coronavirus, unos con la forma atenuada y otros con la inactivada. Muchas vacunas en uso se han elaborado así, como las del sarampión y la polio, pero requieren muchísimas pruebas para garantizar su inocuidad. Sinovac Biotech, en Pekín, ha comenzado a comprobar una versión inactivada del SARS-CoV-2 en humanos.

Virus atenuados
La manera convencional de atenuar un virus consiste en pasarlo por células animales o humanas hasta que incorpore mutaciones que reduzcan su capacidad para provocar la enfermedad. Codagenix, en Nueva York, está trabajando junto con Serum Institute, en India, para atenuar el SARS-CoV-2 mediante la alteración de su genoma y conseguir que las proteínas víricas se sinteticen con menos eficacia.

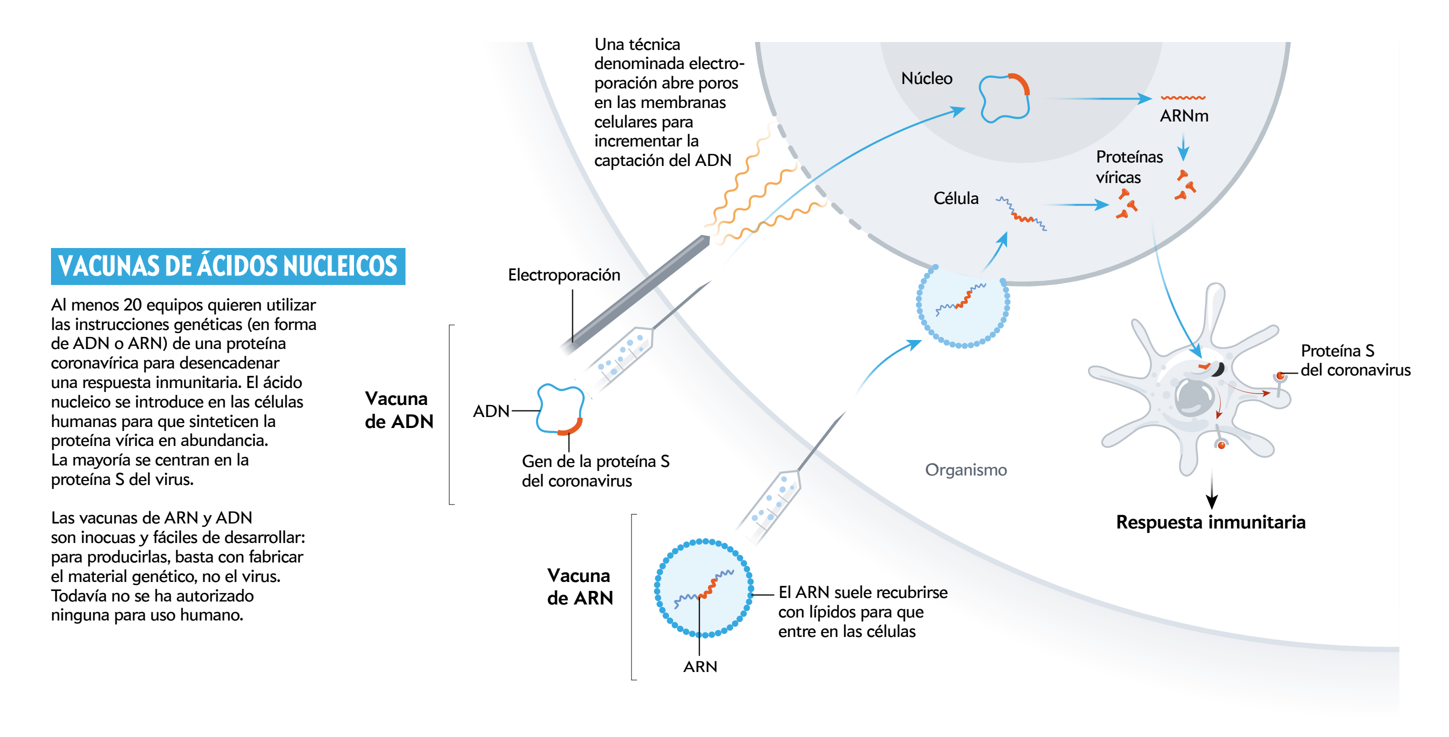
Virus inactivados
En estas vacunas se utilizan sustancias químicas (como formaldehído) o calor para que el virus pierda su capacidad de infección, aunque hay que partir de una gran cantidad de virus infecciosos para fabricarla.



VACUNAS DE ÁCIDOS NUCLEICOS

Al menos 20 equipos quieren utilizar las instrucciones genéticas (en forma de ADN o ARN) de una proteína coronavírica para desencadenar una respuesta inmunitaria. El ácido nucleico se introduce en las células humanas para que sinteticen la proteína vírica en abundancia. La mayoría se centran en la proteína S del virus.

Las vacunas de ARN y ADN son inocuas y fáciles de desarrollar: para producirlas, basta con fabricar el material genético, no el virus. Todavía no se ha autorizado ninguna para uso humano.



VACUNAS CON VECTORES VÍRICOS

Unos 25 grupos están trabajando en vacunas elaboradas con vectores víricos. Se trata de manipular genéticamente un virus, como el del sarampión o un adenovirus, para que sintetice las proteínas coronavíricas en el organismo. Al estar atenuados, no provocarán ninguna enfermedad. Hay dos tipos: los que mantienen su capacidad replicativa en las células y los que no la mantienen porque se les ha inhabilitado ciertos genes.

Vector vírico replicativo (como el virus del sarampión atenuado)
La vacuna contra el ébola recién autorizada es un ejemplo de las elaboradas con un vector vírico que se replica en las células. Suelen ser seguras y provocan una respuesta inmunitaria potente. No obstante, la inmunidad contra el vector podría reducir la eficacia de la vacuna.

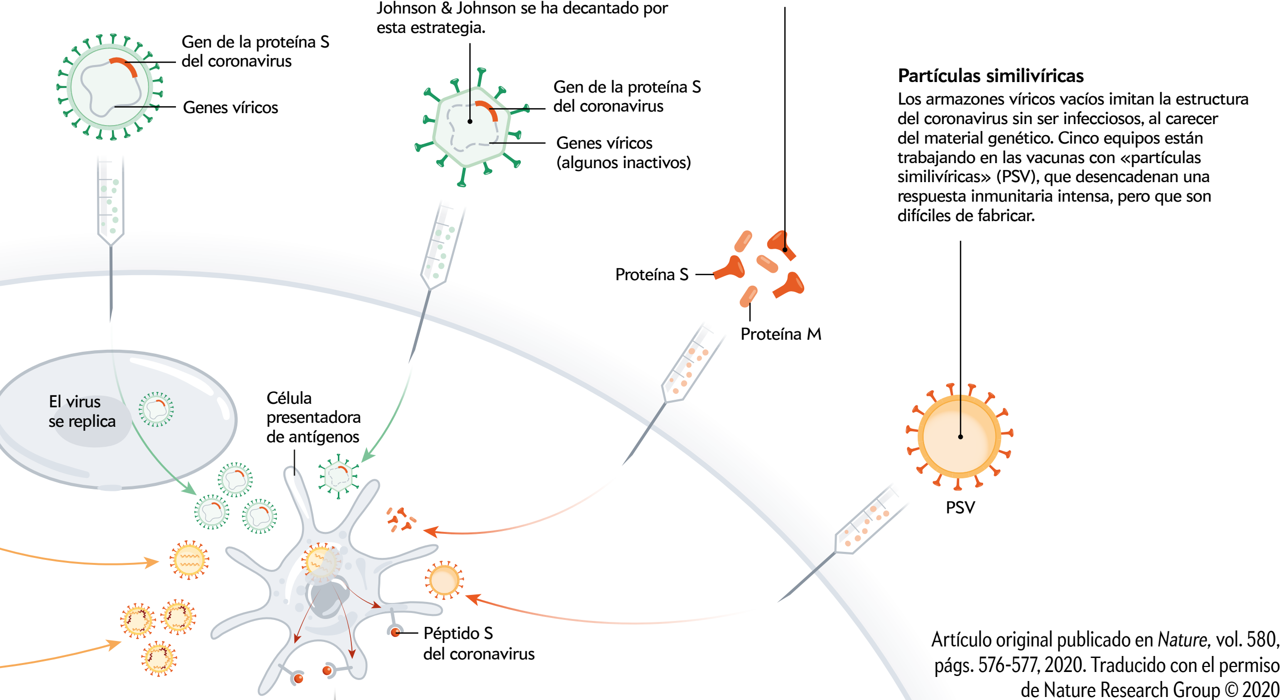
Vector vírico no replicativo (como el adenovirus)
Ninguna vacuna comercial se basa en este método, aunque sí se usa desde hace tiempo para las terapias génicas. Se necesitan inyecciones de recuerdo para inducir una inmunidad duradera. El gigante farmacéutico estadounidense Johnson & Johnson se ha decantado por esta estrategia.

VACUNAS CON PROTEÍNAS

Muchos investigadores quieren inyectar en el organismo las proteínas coronavíricas directamente. También se pueden utilizar fragmentos de ellas o armazones proteicos que imiten la apariencia externa del coronavirus.

Subunidades proteicas
Hay 28 equipos trabajando en vacunas elaboradas con subunidades proteicas del virus. La mayoría se centran en la proteína S o en una parte clave de ella: el dominio de fijación al receptor. Hay vacunas similares que protegen a los monos contra el virus del SARS, pero nunca llegaron a probarse en personas. Para que funcionen, hay que añadirles adyuvantes (moléculas estimulantes de la inmunidad) y administrar varias dosis.

Partículas similivíricas
Los armazones víricos vacíos imitan la estructura del coronavirus sin ser infecciosos, al carecer del material genético. Cinco equipos están trabajando en las vacunas con «partículas similivíricas» (PSV), que desencadenan una respuesta inmunitaria intensa, pero que son difíciles de fabricar.



Artículo original publicado en *Nature*, vol. 580, págs. 576-577, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

FUENTES: PANORAMA DE LAS VACUNAS CONTRA LA COVID-19 DE LA OMS; RASTREADOR DE VACUNAS Y TRATAMIENTOS PARA LA COVID-19 DEL INSTITUTO MILKEN; «SARS-COV-2 VACCINES: STATUS REPORT», FATIMA AMANAT Y FLORIAN KRAMMER EN *IMMUNITY*, VOL. 52, PÁGS. 583-589, ABRIL DE 2020; «THE OUTBREAK OF SARS-COV-2 PNEUMONIA CALLS FOR VIRAL VACCINES», WEILONG SHANG ET AL. EN *NPJ VACCINES*, VOL. 5, MARZO DE 2020. DISEÑO GRÁFICO: NIK SPENCER/*NATURE*

INFORME ESPECIAL

VACUNAS DE ADN O ARN CONTRA EL NUEVO CORONAVIRUS

SOLO LA INGENIERÍA GENÉTICA PUEDE CREAR UN SUERO PROTECTOR EN MESES EN LUGAR DE EN AÑOS

Charles Schmidt

El 10 de enero, cuando los investigadores chinos publicaron el genoma de un virus extraño, de rápida propagación, se confirmó la mayor preocupación de Dan Barouch. El genoma se asemejaba al del coronavirus que causó el brote de SARS en 2003, pero presentaba diferencias notables. «Enseguida me di cuenta de que nadie sería inmune a él», cuenta Barouch, director de virología e investigación de vacunas del Centro Médico Beth Israel Deaconess, en Boston.

En cuestión de días, su laboratorio y otros muchos en todo el mundo comenzaron a diseñar vacunas con la esperanza de proteger a miles de millones de personas frente al virus SARS-CoV-2, la mayor amenaza para la salud y la prosperidad del planeta desde la Segunda Guerra Mundial. A principios de abril, cerca de 80 empresas e instituciones de 19 países estaban investigando vacunas, la mayoría de tipo génico, en lugar de seguir los métodos ortodoxos, como los empleados en las vacunas contra la gripe durante más de 70 años. [En España, unos pocos centros participan en la elaboración de una vacuna, entre ellos el Centro Nacional de Biotecnología, del CSIC]. Los laboratorios predijeron que se podría contar con una vacuna comercial para administración de urgencia o uso compasivo a principios de 2021, algo inusitadamente rápido, a la vista de que se viene a tardar una década en perfeccionar y distribuir vacunas contra patógenos nuevos. Incluso la acelerada vacuna contra el virus del Ébola precisó cinco años para entrar en ensayos clínicos extensos. Si Barouch y sus homólogos logran un remedio seguro y eficaz en un año, será el desarrollo de una vacuna más rápido de la historia, según dice.

Sin embargo, el objetivo no es nada fácil. Aunque los laboratorios han creado varias vacunas génicas frente a otros virus, ninguna se ha comercializado para una enfermedad humana.

Cuando se inyecta una vacuna estándar, ciertas partes del virus penetran en las células cercanas al punto de inyección. El sistema inmunitario reconoce como una amenaza las moléculas de estos fragmentos, llamadas antígenos, y reacciona produciendo anticuerpos, unas proteínas capaces de encontrar el virus en cualquier parte del cuerpo y neutralizarlo. Después de este ensayo general, el sistema inmunitario aprende a deshacerse de los invasores y así está listo para detener una infección en el futuro.

La estrategia tradicional consiste cultivar virus debilitados en huevos de gallina (o, más recientemente, en células de mamíferos o de insectos) y extraer los fragmentos deseados. Para virus conocidos que cambian cada año, como el de la gripe, se suele tardar entre cuatro y seis meses en lograr los antígenos adecuados. Un microorganismo nuevo puede precisar múltiples intentos durante años. Es demasiado tiempo para neutralizar un virus que ya se ha diseminado en proporciones pandémicas.

Por este motivo, numerosos laboratorios están recurriendo a las vacunas génicas. Con la información del genoma del virus, se crea un modelo de antígenos escogidos, que es una secuencia de ADN o ARN (las moléculas portadoras de instrucciones genéticas). Después se inyecta el ADN o ARN en células humanas. Con esas instrucciones, la maquinaria celular fabrica antígenos del virus frente a los que reacciona el sistema inmunitario. Las células responden a las instrucciones como parte normal de su existencia diaria. Precisamente esta característica es la que aprovechan los virus: como no pueden reproducirse solos, fabrican copias de sí mismos



con la maquinaria de la célula. Las nuevas partículas salen de la célula y pasan a las vecinas, propagando la infección.

Prácticamente todos los laboratorios buscan la manera de entrenar a las células humanas para que produzcan un antígeno llamado proteína espiga, o S. Esta molécula protruye del SARS-CoV-2 como un taco en un neumático y permite que el virus se fije a la célula humana y se cuele en su interior. Para introducir la secuencia genética de la espiga en el cuerpo humano, casi todos los laboratorios se basan en uno de los tres planteamientos siguientes. El primero es un plásmido de ADN, por lo común, una molécula pequeña con forma de anillo. Es un recurso muy útil porque, si el virus muta, los investigadores pueden remplazar fácilmente la secuencia genética. Se han elaborado vacunas de plásmidos de ADN para usos veterinarios en peces, perros, cerdos y caballos, pero las aplicaciones humanas se retrasan, sobre todo por la dificultad para atravesar la membrana protectora externa de la célula y llegar a la maquinaria de su interior. Un avance reciente es la inyección de la vacuna con un instrumento que aplica breves descargas eléctricas en las células cercanas al punto de inyección; de este modo se abren poros en las membranas celulares por los que penetra la vacuna.

Inovio Pharmaceuticals, con sede en Plymouth Meeting, Pensilvania, emplea el método del plásmido de ADN. Hace varios años puso en marcha ensayos clínicos dirigidos a las proteínas espiga de otro coronavirus, el que causa el síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS, por sus siglas en inglés). Según el director ejecutivo, Joseph Kim, los niveles de anticuerpos en las personas vacunadas son iguales o superiores a los observados

EN SÍNTESIS

Para obtener con rapidez posibles vacunas frente a la COVID-19, los investigadores emplean la ingeniería genética en lugar de los métodos clásicos, que requieren años.

Tres técnicas distintas con moléculas de ADN y ARN avanzan a toda velocidad hacia la fase de ensayos en humanos, pero no se sabe si funcionarán o si podrán fabricarse a escala de millones de dosis.

Obtención de la vacuna y ensayos

Una vacuna expone al organismo a una versión alterada e inocua de un virus causante de una enfermedad, lo que provoca que el sistema inmunitario produzca anticuerpos, unas proteínas capaces de evitar que el patógeno verdadero infecte a las células. El sistema inmunitario recuerda después cómo neutralizar al invasor. Los científicos disponen de varios métodos para formular una vacuna cuya seguridad y eficacia deben poner a prueba después.

CREAR UN SUERO

Con la estrategia clásica se introduce una versión modificada del virus, o fragmentos de este, en una solución que se inyecta en el organismo. Pero el método es lento. Con los nuevos enfoques de ingeniería genética se introduce en la solución una secuencia genética del virus. Este método es más rápido pero menos comprobado.

Aislar una partícula del virus

Adaptarla para una vacuna

Determinar la secuencia genética del virus

Debilitar el virus (atenuado)

Matar el virus (inactivado)

Emplear partes aisladas del virus (subunidades)

Obtener ciertos genes del virus mediante ingeniería genética y registrar su secuencia

Introducir la secuencia en un plásmido de ADN

Introducir la secuencia en ARN dentro de lípidos

Introducir la secuencia en un adenovirus

Disolver las partículas en una solución y someterla a pruebas

ENSAYARLO EN ANIMALES Y PERSONAS

Las pruebas comienzan en placas de laboratorio y en animales, luego se pasa a los humanos, desde unos pocos hasta decenas de miles. Si la vacuna causa efectos secundarios graves, no produce anticuerpos o no protege a un gran número de personas, se abandona.

ENSAYOS PRECLÍNICOS

Pruebas de laboratorio en cultivos y animales

¿Es demasiado tóxica?

No

Sí

¿Induce a las células del sistema inmunitario a producir anticuerpos que detecten el virus y se unan a él?

Sí

No

Detener el ensayo

ENSAYOS CLÍNICOS
Pruebas en humanos

Fase 1: ¿Es inocua la vacuna? ¿Sin efectos secundarios perjudiciales? ¿Produce anticuerpos el sistema inmunitario?

Personas estudiadas: decenas

No

Sí

Fase 2: ¿Es inocua la vacuna? ¿Es intensa la respuesta inmunitaria? ¿Es correcta la dosis?

Personas estudiadas: centenares

No

Sí

Fase 3: ¿Previene de forma segura la infección y la enfermedad en un gran número de personas?

Personas estudiadas: decenas de miles

Sí

PRODUCCIÓN

Una vacuna satisfactoria debe ser aprobada por las autoridades sanitarias, luego se fabrica a gran escala y se evalúa la calidad del producto.

JEN CHRISTIANSEN

en las muestras de sangre de enfermos que se recuperaron [de forma natural] del MERS. La empresa ha adaptado su plataforma (el plásmido y los medios para ponerlo a prueba) con objeto de elaborar una vacuna contra el SARS-CoV-2.

Las vacunas de plásmidos de ADN transfieren la información genética que portan al ARN de la maquinaria celular, que produce los antígenos de la espiga. Pero es posible omitir el paso del plásmido mediante la incorporación de la información genética en una hebra de ARN; este segundo enfoque es el de las vacunas de ARN. El ARN es transportado dentro de lípidos que se inyectan en el organismo: estas moléculas grasas entran fácilmente en las células. Según las investigaciones, las vacunas de ARN superarían a los plásmidos de ADN en cuanto a la activación del sistema inmunitario para producir anticuerpos. También parecen inducir una inmunidad más potente (mayor memoria del sistema inmunitario) y, por tanto, requerir menores dosis. Se están llevando a cabo ensayos clínicos de fase inicial con vacunas de ARN para otras enfermedades víricas, como la rabia, la infección por VIH y la fiebre de Zika. Moderna, en Cambridge, Massachusetts, emplea esta táctica para el SARS-CoV-2.

Las vacunas de ARN son menos estables que las de plásmidos de ADN, ya que las enzimas habituales del organismo las degradan rápidamente. El calor también las deteriora. En general, las vacunas de ARN deben mantenerse congeladas o refrigeradas, lo que supone inconvenientes logísticos, sobre todo en los países más pobres. Las de plásmidos de ADN son estables a mayores temperaturas.

En Johnson & Johnson, Barouch y su grupo trabajan con un tercer planteamiento: insertar la secuencia de ADN en un virus del resfriado común. Una vez inyectado, este vector adenovírico, como se le llama, infecta las células humanas e introduce en ellas la secuencia que porta. Los adenovirus penetran con facilidad en las células, aunque se ha demostrado que el sistema inmunitario humano reconoce enseguida algunos de ellos y los ataca antes de que lleguen a su destino. Barouch emplea un adenovirus que, según las pruebas, es poco probable que sea reconocido. Algunos expertos también temen que el propio adenovirus se replique en el organismo y cause enfermedades. Para evitar esa posibilidad, el equipo de Barouch usa un virus genomodificado no replicativo; es incapaz de producir copias de sí mismo dentro de la célula humana porque necesita para la replicación una sustancia que el cuerpo humano no le aporta. A finales de abril, la Universidad de Oxford comenzó un pequeño ensayo con otro adenovirus no replicativo.

Una vez que se confirma la funcionalidad básica de una vacuna en los cultivos de laboratorio, se evalúa en animales para ver si es inocua y si provoca una respuesta inmunitaria. A continuación, se prueba en las personas: primero en pequeños grupos para verificar la seguridad y los efectos secundarios, y luego en números cada vez mayores para determinar su eficacia. El plásmido de ADN de Inovio inició la fase de estudios humanos a escala reducida el 6 de abril, solo tres meses después de la publicación del genoma del SARS-CoV-2. Moderna comenzó pequeños ensayos clínicos de su vacuna de ARN incluso antes, el 16 de marzo, y en abril el Gobierno de Estados Unidos prometió destinar hasta 483 millones de dólares para acelerar la producción en masa si los ensayos salieran bien. El laboratorio de Barouch ideó un prototipo de vacuna de adenovirus en solo cuatro semanas. Johnson & Johnson, en colaboración con aquel, la está probando ahora en ratones, hurones y macacos. El 30 de marzo, el Gobierno de Estados Unidos y Johnson & Johnson consignaron más de mil millones de dólares para financiar ensayos clínicos a gran escala, que está previsto que comiencen en septiembre si los estudios reducidos son satisfactorios.

Aunque el tiempo transcurrido desde el brote de la epidemia hasta las pruebas restringidas ha sido mucho más rápido que si se hubiera seguido el método del huevo, no hay seguridad de que los ensayos prolongados de vacunas genomodificadas no vayan a requerir años. Por suerte, el SARS-CoV-2 no parece mutar tan rápido como el virus de la gripe, lo que permite suponer que, una vez obtenida, una vacuna eficaz podría conferir una protección duradera.

Además de la eficacia, los expertos vigilan los ensayos clínicos para detectar una «potenciación de la enfermedad», esto es, la posibilidad de que la vacuna empeore involuntariamente los síntomas de la COVID-19, la enfermedad que causa el SARS-CoV-2. En hurones que recibieron una vacuna experimental contra el SARS en 2004 apareció una inflamación nociva. Kim asegura que los humanos tratados con las vacunas experimentales anti-SARS no sufrieron una intensificación de la enfermedad. Pero esas formulaciones nunca llegaron a los ensayos clínicos a gran escala porque la epidemia, que afectó a unas 8000 personas en casi 30 países, se extinguió en poco más de un año.

Las empresas están acelerando el tiempo de desarrollo de una vacuna contra el SARS-CoV-2, en parte, mediante su estudio en múltiples especies animales a la vez y, al mismo tiempo, con un número reducido de personas. El proceso habitual es evaluar un animal cada vez y, después, a las personas, para asegurarse de que los efectos secundarios son de escasa entidad, la respuesta inmunitaria es importante y la enfermedad desaparece. La falta de tiempo explica ese mayor riesgo.

Proteger el mundo frente a la COVID-19 va a precisar una enorme capacidad de fabricación. Nunca se han producido vacunas de plásmidos de ADN o de ARN en millones de dosis, y las empresas pequeñas, como Inovio y Moderna, no tendrían por sí solas la capacidad necesaria. A decir de Barouch, la vacuna de adenovirus exige más tiempo al principio, pero una vez validada, podrá fabricarse a gran escala rápidamente. Con el método de adenovirus, Johnson elaboró millones de dosis de una vacuna contra el virus del Ébola, que ahora se está evaluando en ensayos clínicos de grandes dimensiones. Algunos grupos están investigando otras técnicas de ADN que podrían llevar más tiempo.

Ningún prototipo de vacuna es un claro favorito todavía, en opinión de Brenda G. Hogue, especialista en virología y coronavirus en la Universidad Estatal de Arizona. Pero sostiene que la rapidez de las investigaciones genéticas y la enorme dedicación de las empresas son alentadores: «Me siento muy optimista». IyC

Charles Schmidt es periodista científico especializado salud y medioambiente.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fármacos basados en ADN. Matthew P. Morrow y David B. Weiner en *IyC*, septiembre de 2010.

No nos apresuremos en lanzar vacunas y medicamentos para la COVID-19 sin suficientes garantías de seguridad. Shibo Jiang en investigacionyciencia.es, 20 de marzo de 2020.

La carrera contrarreloj frente al nuevo coronavirus. Marta Consuegra Fernández en *IyC*, abril de 2020.

Ocho estrategias para obtener una vacuna contra el nuevo coronavirus. Ewen Callaway, *en este mismo número*.



INFORME ESPECIAL

¿CÓMO EVOLUCIONARÁ LA PANDEMIA DE COVID-19?

LAS ÚLTIMAS EPIDEMIAS NOS OFRECEN PISTAS SOBRE LOS POSIBLES DESENLACES

Lydia Denworth

Sabemos cuál es el origen de la pandemia de COVID-19: murciélagos cerca de Wuhan que albergaban una mezcla de cepas de coronavirus. En algún momento del otoño pasado, una cepa lo bastante oportunista como para pasar de una especie a otra abandonó a su hospedador u hospedadores y acabó en una persona. Y empezó a propagarse.

Pero nadie sabe, de momento, cómo acabará la pandemia. No hay precedentes de una enfermedad con una combinación de características similar: una alta transmisibilidad, un amplio abanico de síntomas y una extensión tan enorme que ha detenido el mundo. En algunos casos, la alta vulnerabilidad de la población ha causado un crecimiento casi exponencial de los infectados. «Es una situación diferente y muy novedosa», indica la epidemióloga y bióloga evolutiva Sarah Cobey, de la Universidad de Chicago.

Pero algunas pandemias anteriores nos ofrecen pistas sobre cómo evolucionará la actual. Aunque no contamos con ningún ejemplo histórico que podamos seguir, la humanidad ha sufrido grandes epidemias en los últimos ciento y pico años que, de repente, dejaron de arrasar la sociedad; se detuvieron abruptamente. El modo en que eso ocurrió puede servir de orientación para un mundo que está buscando cómo recuperar la salud y cierta sensación de normalidad. Según Cobey y otros expertos, tres de esas experiencias sugieren que lo que pase después depende a la vez de la evolución del patógeno y de la respuesta humana, tanto biológica como social.

EN SÍNTESIS

Para derrotar al virus tal vez sea necesario un conjunto de actuaciones como las que detuvieron epidemias históricas: medidas de control social, medicamentos y una vacuna.

UN PROBLEMA DE PROPAGACIÓN

Los virus mutan constantemente. Los que desencadenan pandemias son lo suficientemente novedosos como para que el sistema inmunitario humano no los identifique de inmediato como invasores peligrosos. Obligan al cuerpo a crear una defensa completamente nueva, con anticuerpos y otros componentes inmunitarios que puedan reaccionar y atacar al virus. Un gran número de personas enferman a corto plazo, y factores sociales como las multitudes y la ausencia de medicamentos pueden hacer crecer aún más esa cifra. Al final, una proporción importante de la población afectada desarrolla anticuerpos contra la enfermedad, lo que le confiere una inmunidad a largo plazo y limita la transmisión vírica entre personas. Pero pueden transcurrir varios años hasta que eso suceda.

Mientras tanto, deberemos aprender a vivir con la enfermedad. El ejemplo más famoso en la historia moderna nos lo ofrece la epidemia de gripe H1N1 de 1918-1919. Los médicos y los funcionarios de salud pública disponían de muchas menos ar-

mas, y la eficacia de las medidas de control, como el cierre de colegios, dependía de lo pronto que se tomasen y lo estrictas que fuesen. Después de dos años y tres oleadas, la pandemia infectó a 500 millones de personas y mató a entre 50 y 100 millones. Acabó solo cuando las infecciones naturales confirieron inmunidad a aquellos que se habían recuperado.

La cepa H1N1 se convirtió en endémica, aunque en una versión más leve que circuló otros 40 años como virus estacional. Fue necesaria otra pandemia (la del virus H2N2 en 1957) para que se extinguiese la mayor parte de la cepa de 1918. Se puede decir que un virus de la gripe expulsó a otro, aunque no se sabe muy bien cómo ocurrió. Los esfuerzos humanos para hacer lo mismo han fracasado. «La naturaleza lo puede hacer, nosotros no», indica Florian Krammer, virólogo de la Escuela de Medicina Icahn del Monte Sinaí, en Nueva York.

¿Cómo pueden ayudar las medidas de contención? La epidemia de 2003 del síndrome respiratorio agudo grave (SARS, por sus siglas en inglés) no fue causada por un virus de la gripe, sino por un coronavirus, el SARS-CoV, íntimamente relacionado con el causante de la pandemia actual, el SARS-CoV-2. De los siete coronavirus humanos conocidos, cuatro circulan ampliamente y causan hasta una tercera parte de los resfriados comunes. El responsable de la epidemia de SARS era mucho más virulento. Gracias a varias estrategias epidemiológicas enérgicas, como aislar a los enfermos, poner en cuarentena a sus contactos y el control social, los peores brotes se limitaron a un par de localizaciones, como Hong Kong y Toronto. La contención fue posible porque la enfermedad se manifestaba pronto y de forma clara; casi todos los infectados presentaban síntomas graves. Y contagiaban a otras personas después de enfermar, no antes. «La mayoría no fueron contagiosos hasta una semana después de que aparecieran los síntomas», explica el epidemiólogo Benjamin Cowling, de la Universidad de Hong Kong. «Si se identificaban y aislaban esa misma semana, la infección dejaba de propagarse.» La contención funcionó tan bien que solo hubo 8098 infectados de SARS en todo el mundo, de los cuales fallecieron 774. Desde 2004 no ha aparecido ningún otro caso.

Pero la gran baza contra las epidemias son las vacunas. Cuando, en 2009, una nueva cepa de la gripe H1N1, conocida como gripe porcina, causó una pandemia, «saltó la alarma porque se trataba de un virus totalmente nuevo», indica Cowling, «muy parecido a la cepa letal de 1918». No obstante, al final demostró no ser tan grave como se temía. En parte, explica Krammer, «fuimos afortunados porque la patogenicidad del virus no era muy alta». Pero otra razón importante fue que, a los seis meses de aparecer la cepa, ya se había desarrollado una vacuna.

A diferencia de las vacunas contra el sarampión o la viruela, que confieren inmunidad a largo plazo, las de la gripe protegen un par de años. Los virus de la gripe son escurridizos, mutan rápidamente para eludir la inmunidad, por lo que las vacunas deben actualizarse cada año. Pero, en una pandemia, incluso una vacuna a corto plazo es una bendición. La de la gripe porcina ayudó a atemperar una segunda oleada de casos durante el invierno. Como resultado, el virus recorrió más rápidamente el mismo camino que el virus de 1918 y se convirtió en una gripe estacional, con una distribución muy amplia. Mucha gente está hoy protegida contra ella gracias a las vacunas de la gripe o a los anticuerpos creados en una infección previa.

EL FINAL DEL VIRUS ACTUAL

Las proyecciones sobre cómo evolucionará la COVID-19 son pura especulación, pero para poder acabar con ella será necesario, casi con toda seguridad, poner en marcha una combinación de todas las estrategias utilizadas en pandemias anteriores: medidas de control social para ganar tiempo, nuevos antivíricos para aliviar los síntomas y una vacuna. La fórmula exacta dependerá en gran parte del cumplimiento de las medidas y la eficiencia con la que reaccionen los Gobiernos. En la COVID-19, la contención funcionó en lugares como Hong Kong y Corea del Sur, pero se aplicó demasiado tarde en Europa y Estados Unidos. «La cuestión sobre cómo evoluciona la pandemia es, al menos en un 50 por ciento, social y política», afirma Cobey.

El otro 50 por ciento lo aportará probablemente la ciencia. Los investigadores se han unido como nunca antes y están trabajando en múltiples frentes en busca de soluciones. Si cualquiera de los antivíricos en desarrollo demuestra ser eficaz, mejorará las opciones de tratamiento y reducirá la cifra de enfermos graves y fallecimientos. También sería de gran utilidad disponer de una técnica para detectar los anticuerpos que neutralizan el SARS-CoV-2, como un indicador de la inmunidad en los pacientes recuperados. Krammer y sus colaboradores han desarrollado una de esas pruebas serológicas. Aunque no acabarán con la pandemia, servirán para identificar personas con sangre rica en anticuerpos que podría ayudar a los pacientes críticos; también permitirán que las personas vuelvan antes a trabajar al señalar quiénes se han librado del virus y se han vuelto inmunes.

Hará falta una vacuna para detener la transmisión. Ello todavía requerirá tiempo, tal vez un año, más o menos. Aun así, hay razones para pensar que esa medida resultará eficaz. Comparados con los virus de la gripe, los coronavirus no tienen tantas vías para interactuar con las células del hospedador. Según Krammer, «si desaparece tal interacción, [el virus] ya no se podrá replicar. Esa es la ventaja con la que contamos». No está claro si una vacuna conferirá inmunidad a largo plazo, como ocurre con la del sarampión, o, por el contrario, será de corto plazo, como la de la gripe. Pero, «en este momento, cualquier vacuna sería de gran ayuda», indica la epidemióloga Aubree Gordon, de la Universidad de Michigan.

A menos que se vacune al resto de los 8000 millones de habitantes del planeta que actualmente no están enfermos o que se han recuperado, es muy probable que la COVID-19 se vuelva endémica. Circulará y enfermará a la gente estacionalmente, a veces de forma grave. Pero, si permanece el tiempo suficiente en la población humana, el virus empezará a infectar a los niños en sus primeros años de vida. Estos suelen presentar síntomas leves (aunque no siempre) y, si se volvieran a infectar de adultos, parece ser que serían menos propensos a enfermar gravemente. La combinación de vacunación e inmunidad natural nos protegerá a muchos. El coronavirus, como la mayoría de los virus, seguirá viviendo entre nosotros, aunque no como una lacra planetaria. IyC

Lydia Denworth es periodista científica. Ha escrito artículos y libros sobre temas diversos, en especial sobre neurociencia y comportamiento social.

EN NUESTRO ARCHIVO

El virus de la gripe de 1918. J. K. Taubenberger, Ann H. Reid y Thomas G. Fanning en *IyC*, marzo de 2005.
Nueva gripe humana de origen porcino. Esteban Domingo en *IyC*, junio de 2009.
La pandemia de COVID-19 a la luz de la historia de la medicina. María José Báguena, *en este mismo número*.

por Juan José Negro y Carlos Camacho

Plumas fluorescentes en aves nocturnas

Situadas en la parte inferior de las alas, podrían servir para la comunicación entre individuos en condiciones de baja luminosidad

Búhos y chotacabras son aves nocturnas con plumajes típicamente crípticos que les permiten confundirse con el suelo y la vegetación de sus lugares de reposo diurnos. De modo sorprendente, todas las especies de estos grupos acumulan en las plumas unos pigmentos denominados porfirinas. Aunque la visión humana no puede percibirlas, si las iluminamos con un haz de luz ultravioleta emiten fluorescencia de un tono intensamente rosado.

Las porfirinas se degradan rápidamente con la luz diurna, por lo que incluso en las aves nocturnas que se esconden durante el día la fluorescencia se mitiga con el tiempo y adopta una tonalidad más azulada.

En la población de chotacabras cuellirrojo del Espacio Protegido de Doñana hemos demostrado que existen importantes diferencias entre individuos en la extensión de la fluorescencia bajo las alas, según hemos descrito en un artículo publicado el pasado diciembre en *Scientific Reports*. Los juveniles presentan más fluorescencia que los adultos, pero no hay diferencias notables entre machos y hembras. Entre los jóvenes, los que presentan un mayor peso emiten también mayor fluorescencia. Este último dato sugiere que la fluorescencia podría relacionarse con la calidad de los individuos y su capacidad reproductiva, como también se ha descrito en los búhos.

Un problema sin resolver por el momento es si búhos y chotacabras son realmente capaces de percibir la fluorescencia de sus congéneres en condiciones naturales. Se piensa que tal vez lo consiguen bajo la tenue luz del crepúsculo o la luz de la luna.

El siguiente paso en el conocimiento de la función biológica de la fluorescencia rosa en el plumaje de las aves consistirá, precisamente, en demostrar que hay aves que pueden integrar esas señales en sus sistemas de comunicación visual. Si solo algunas especies tuvieran esa capacidad, como los búhos y las chotacabras, nos encontraríamos ante un ejemplo de canal de comunicación privado, que ni sus presas ni sus enemigos podrían descifrar.

—Juan José Negro y Carlos Camacho
Estación Biológica de Doñana-CSIC



c

EL ALA DE UN CHOTACABRAS CUELLIRROJO a, capturado en el Parque Nacional de Doñana, es examinada en un soporte equipado con una linterna de luz ultravioleta b. Bajo esta luz, las plumas emiten fluorescencia de azul a rosa, con una mayor intensidad en los raquis, o ejes centrales c. Después de la toma de datos, el chotacabras es liberado en el parque d.

CARLOS CAMACHO (a, b y d), JUAN J. NEGRO (c)





por María José Báguena Cervellera



María José Báguena Cervellera, experta en historia de las enfermedades infecciosas, es profesora titular de historia de la ciencia de la Universidad de Valencia e investigadora del Instituto interuniversitario López Piñero.

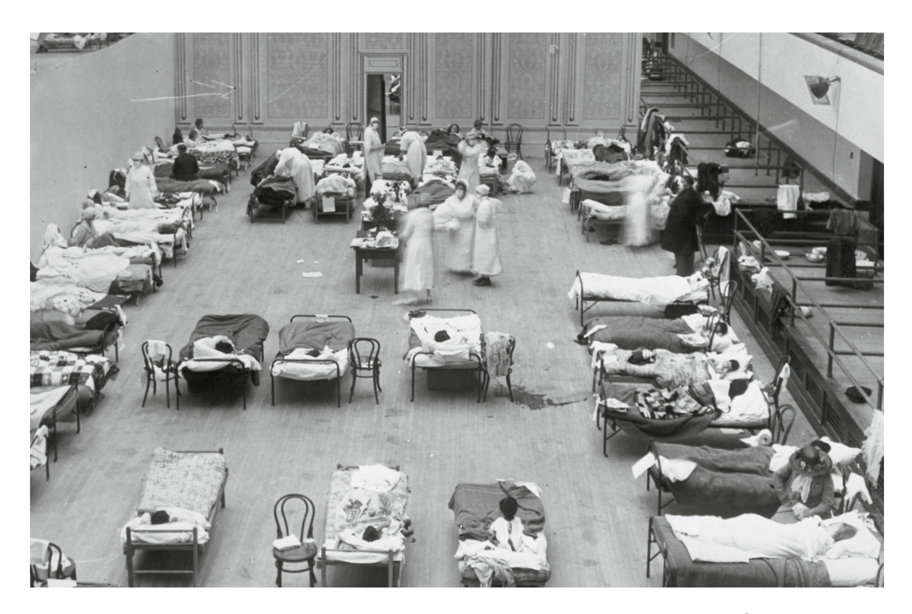
La pandemia de COVID-19 a la luz de la historia de la medicina

Qué podemos aprender de las otras grandes pandemias del pasado

La actual pandemia producida por el nuevo coronavirus SARS-CoV-2 ha originado, desde que a finales de 2019 surgiera en la ciudad china de Wuhan, el contagio de más de dos millones y medio de personas en 185 países de todo el mundo, con una cifra de fallecidos que superaba los 180.000 a finales de abril. Estados Unidos, España e Italia albergan el mayor número de casos diagnosticados y de muertes por la enfermedad, que se concentran sobre todo en personas de edad avanzada y con patologías previas. Ello ha obligado a los Gobiernos a tomar medidas de distanciamiento social, mientras los sistemas sanitarios se han visto sometidos a una presión asistencial que los dejaba al borde del colapso.

La población asiste desde su confinamiento a la rápida expansión de una infección hasta ahora desconocida, lo que genera miedo, confusión, desconfianza ante la información recibida y las medidas adoptadas por las autoridades e incertidumbre sobre la finalización del estado de alarma y la vuelta escalonada a una forma de vivir cuyas condiciones se desconocen. Junto a la tragedia de las vidas perdidas, la magnitud de las gravísimas repercusiones que tiene y tendrá la pandemia sobre la economía componen un escenario complejo que no reconocemos como propio, como si nunca antes la humanidad se hubiera visto obligada a afrontar una situación parecida.

¿Es así? ¿Se pueden encontrar similitudes con otras epidemias del pasado en cuanto a la manera de originarse, la forma de expandirse, el pánico desatado en la población, las medidas tomadas por las autoridades para frenar el contagio y las repercusiones médicas, demográficas y económicas? La reflexión históricomédica sobre la evolución de las infecciones puede darnos una perspectiva amplia que ayude a comprender mejor epidemias actuales como la de COVID-19, que guarda paralelismos con otras grandes pandemias anteriores.



EL AUDITORIO MUNICIPAL de Oakland se adaptó para poder atender a los afectados por la gripe de 1918.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

El origen de las enfermedades infecciosas fue, durante mucho tiempo, objeto de controversia. Los médicos griegos, basados en la idea del equilibrio entre el hombre y su entorno, pensaban que las epidemias eran causadas por la conjunción de determinadas condiciones atmosféricas y locales, lo que llevó a la noción de «constitución epidémica». A lo largo de la Edad Media se admitía como origen de la enfermedad infecciosa una corrupción o alteración del aire atmosférico producida por la presencia de los llamados miasmas, vapores o exhalaciones de carácter nocivo que provenían de la materia orgánica en descomposición o del agua estancada y que, al ser introducidos en el organismo por la respiración, alteraban los humores corporales.

Esta teoría miasmática se mantuvo con pocas variaciones hasta el siglo XIX. Durante esta centuria, las ideas acerca de la etiología infecciosa siguieron tres etapas claramente diferenciadas. En una primera etapa, que abarca hasta los años cincuenta, la teoría miasmático-atmosférica fue predominante. En las décadas cincuenta y sesenta algunos científicos defendieron que los causantes del contagio eran seres vivos microscópicos, pero no pudieron aislarse. Esta teoría del contagio animado quedó probada a finales de siglo con la demostración experimental de la transmisión microbiana de la enfermedad, lo que llevó a la consolidación de la microbiología médica.

La peste originó las primeras epidemias conocidas. Causada por una bacteria, se transmitía a partir de la picadura de la pulga de la rata negra infectada. Si el microorganismo llegaba a los pulmones, producía una neumonía y la transmisión del agente infeccioso a través de las gotas

de saliva, lo que aumentaba su contagiosidad. La epidemia de peste más conocida es la denominada peste negra, aparecida a mediados del siglo XIV. Murió un tercio de la población mundial, entre 75 y 200 millones de personas. Como causa de la enfermedad se recurrió a los miasmas transmitidos por el aire y responsables de su mal olor, de ahí la polisemia del vocablo *peste*. A estos miasmas se les atribuía una consistencia pegajosa que les hacía adherirse a los objetos y también los eliminaba el enfermo a través del sudor. El contacto con ellos podía producir, asimismo, la enfermedad, por lo que se dispusieron medidas de aislamiento para los apestados y para las personas y mercancías que vinieran de lugares epidemiados, que tenían que pasar una cuarentena (periodo de cuarenta días) antes de obtener permiso para entrar en una población. Se pensaba que, pasado ese tiempo, ya no se produciría el contagio.

Cuando, cinco siglos después, el cólera llegó por vez primera a Europa procedente de la India, ocasionando alrededor de trescientas mil muertes, el pánico ante una enfermedad hasta entonces desconocida fuera del subcontinente hindú volvió a adueñarse de la población, situación que se repitió a lo largo de las sucesivas pandemias que se propagaron durante el siglo XIX. Hasta que en 1883 el bacteriólogo alemán Robert Koch demostró que se transmitía mediante el agua de bebida contaminada con el bacilo colérico, al cólera se le atribuyó un origen atmosférico a través de miasmas y se adoptaron las medidas habituales de establecimiento de cordones sanitarios y cuarentenas y fumigación de personas y objetos con desinfectantes gaseosos.

El cambio del paradigma etiológico miasmático por el microbiano a través del agua tardó en aceptarse. Ese mismo año de 1883, el médico Vicente Peset Cervera escribía en *La crónica médica*: «no es necesario hervir el agua antes de beberla ni cocer los frutos. Con tan ridículas medidas, imposibles en la práctica, pudiera suceder lo que al mentecato, que se rodea de vapores rutilantes y corrosivos para evitar el contagio, lo cual consigue, pero muere abrasado por aquellos. Estas [las pandemias] no se ceban con los individuos aseados, que usan de una buena alimentación y se visten con el ropaje de la higiene. Haced, pues, saludables los pueblos y no temáis los crueles azotes».

Dos años después, durante la cuarta pandemia de cólera, las medidas de prevención ya se guiaban por la etiología bacteriana y al aumento de la limpieza de las calles y el aislamiento de los coléricos se unió la limpieza de las alcantarillas, el consejo de hervir el agua antes de consumirla y el control de la potabilidad del agua de bebida mediante su análisis bacteriológico en el laboratorio. Cuando el avance de la epidemia hacía inviable el aislamiento de los enfermos en sus viviendas, se habilitaban lazaretos para aquellas personas que habían tenido algún contacto con coléricos y eran mantenidas en observación por si estuvieran en periodo de incubación. Se abrieron también hospitales específicos para enfermos de cólera, con el fin de que no mantuvieran contacto con los pacientes ingresados por otras patologías. A estas medidas se añadió la aplicación de la primera vacuna anticolérica desarrollada en el mundo. Fue descubierta por el bacteriólogo catalán Jaime Ferrán Clúa, que llevó a cabo una campaña de vacunación en la ciudad de Valencia y en diferentes poblaciones de la provincia invadidas por el cólera en 1885.

Ya en la centuria siguiente tuvo lugar otra gran pandemia que guarda bastantes similitudes con la de COVID-19: la llamada gripe española de 1918-1919. También se transmitía con gran rapidez, por vía respiratoria. Su velocidad de expansión por todo el mundo a través del transporte humano y de mercancías fue superior a la alcanzada por las pandemias de cólera del siglo XIX y abarcó una extensión mayor que la peste negra. La magnitud de su repercusión epidémica no volvió a alcanzarse hasta la aparición del sida en la década de los ochenta.

A pesar de su denominación, no se originó en España, sino en Estados Unidos, en un campamento militar en Funston (Kansas) el 4 de marzo de 1918. Fue traída a Europa por los soldados estadounidenses que combatieron en la Primera Guerra Mundial, y los primeros casos se dieron el 1 de abril en las ciudades francesas de Brest y Burdeos. La censura militar impidió que las noticias sobre su rápida expansión y su elevada mortalidad llegaran a la prensa de los países combatientes, para evitar la desmoralización de las tropas y de la población. No era el caso de España, que vio el primer brote en Madrid en el mes de mayo, dos meses después de su llegada silenciada al continente europeo.

Se utilizó el aislamiento para prevenir el contagio, con el establecimiento de cordones sanitarios y cuarentenas, lo que no evitó que alrededor de un tercio de la población mundial se infectara y que 75 millones de personas murieran a causa de la enfermedad en las tres oleadas que se produjeron: en la primavera y el otoño de 1918 y en los primeros meses de 1919, una cifra de muertes superior a la provocada por la Primera Guerra Mundial en los cuatro años que duró. La falta de alimentos y medicamentos, la destrucción de viviendas y una infraestructura sanitaria fuertemente dañada tras la contienda multiplicaron el impacto y la gravedad de la pandemia. En España fallecieron doscientas setenta mil personas, sobre todo adultos jóvenes, entre los 20 y los 40 años. Su tasa de letalidad, por encima del 2,5 por ciento, superó con mucho las tasas del 0,1 por ciento habituales en anteriores epidemias de gripe.

La medicina apenas tuvo recursos para combatir esa pandemia. No se conocía su etiología vírica, por lo que no se disponía de una vacuna para prevenirla ni de medidas terapéuticas como sueros o antivíricos. Tampoco se contaba con antibióticos que pudieran combatir las graves complicaciones respiratorias que ocasionaba, sobre todo neumonías y bronquitis.

La repercusión de las anteriores pandemias en la sociedad fue en todos los casos muy elevada, no solo por sus implicaciones sanitarias, sino también económicas, demográficas, científicas y emocionales por el miedo desencadenado ante lo desconocido. Y, en todas ellas, la población más desfavorecida fue la que padeció con mayor crudeza sus consecuencias, al igual que con la COVID-19. La prevención, una buena información por parte de médicos y autoridades y la solidaridad son hoy tan importantes y necesarias como entonces. IyC

PARA SABER MÁS

The black death transformed: Disease and culture in early Renaissance Europe. Samuel K. Cohn Jr. Arnold and Oxford University Press, 2002.

Cholera: The biography. Christopher Hamlin. Oxford University Press, 2009.

The Spanish influenza pandemic of 1918-1919: Perspectives from the Iberian Peninsula and the Americas. Dirigido por María Isabel Porras Gallo y Ryan A. Davis. Boydell & Brewer, University of Rochester Press, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La Peste Negra. Colin McEvedy en *IyC*, abril de 1988.

La perenne enfermedad. José María Valderas Martínez en *Epidemias*, colección *Temas* de *IyC* n.º 18, 1999.

Y se llamó gripe española. Anton Erkoreka Barrena en *IyC*, junio de 2017.

por Óscar Arnedillo Blanco y Jorge Sanz Oliva

Óscar Arnedillo Blanco y **Jorge Sanz Oliva** son, respectivamente, director gerente y director asociado de NERA Economic Consulting. Sanz Oliva preside además la Comisión de Expertos para la Transición Energética.



Cómo descarbonizar la economía

Una combinación adecuada de electrificación, renovables y medidas económicas que eviten las «fugas de carbono» permitiría lograr ese objetivo para 2050

Existe un amplio consenso sobre la grave amenaza del cambio climático y la necesidad de alcanzar la neutralidad en las emisiones de CO_2 antes de 2050. La Unión Europea ya se ha comprometido a reducirlas en un 40 por ciento para 2030 (con respecto a 1990) y la nueva Comisión Europea pretende incrementar ese objetivo hasta el 55 por ciento. Pero las sucesivas Cumbres del Clima no logran arrancar a los Gobiernos compromisos firmes por temor a que la descarbonización suponga costes inasumibles para el PIB y el empleo. Desde nuestra perspectiva, sí es posible, pero con una profunda transformación de la economía.

Capturar y almacenar el CO_2 que generan los combustibles fósiles tiene un coste elevado, por las infraestructuras que se necesitan para almacenar el gas en depósitos subterráneos, de capacidad limitada. Y, aunque los biocombustibles (en la práctica, neutros en carbono) puedan ofrecer parte de la solución, es poco probable que se produzcan en suficiente cantidad. En cuanto a los combustibles sintéticos, no existe una limitación a su producción y podrían estar libres de emisiones en la medida en que se sinteticen con electricidad de origen renovable. No obstante, su coste tenderá a ser siempre superior al de la electricidad, pues esta es uno de sus principales insumos.

Las instalaciones eólicas y fotovoltaicas ya existentes producen electricidad con costes competitivos respecto a la energía del gas y del carbón. El problema es que son «intermitentes», porque dependen de que sople el viento o brille el sol. Las centrales hidroeléctricas pueden ajustar su funcionamiento para producir electricidad cuando la necesitamos, pero su potencial de desarrollo es limitado.

En España, las instalaciones de energía renovable (incluida la hidráulica) contribuyen ya al 40 por ciento de toda la producción de electricidad, algo impensable hace una década, pero la intermitencia de esta producción hace difícil que a corto plazo se supere el 75 por ciento. No obstante, la rápida caída del coste de las baterías y la creciente capacidad de la demanda eléctrica para adaptarse a las variaciones de los precios harán que entre 2045 y 2050 toda la electricidad esté libre de emisiones.

El problema es que, en la mayoría de los países industrializados, la electricidad tiene un peso reducido en el consumo total de energía: en torno al 25 por ciento. De ahí que, aunque lográramos producir toda la electricidad con fuentes renovables, estaríamos muy lejos de un sistema energético sin emisiones. Por consiguiente, «descarbonizar» la economía requerirá «electrificarla», es decir, pasar de consumir combustibles fósiles a usar electricidad, y que esta sea de origen renovable.



En los hogares, ya pueden cubrirse todas las necesidades energéticas (calor, frío, luz, cocina) con electricidad. En el transporte por carretera, el menor coste de las baterías está impulsando la compra de vehículos eléctricos. En el marítimo y el aéreo, así como en la industria, los biocombustibles y los combustibles sintéticos cubrirán aquellos nichos que no puedan ser suministrados con electricidad.

Para descarbonizar no es necesario reducir el consumo de energía, pero sí una profunda transformación de la economía. Dada la multiplicidad de opciones y situaciones, esta transformación no podrá estar subvencionada por los Gobiernos, porque los costes se dispararían. La estrategia debe pasar por incrementar el precio de las emisiones y dejar de penalizar el consumo eléctrico frente al de combustibles fósiles, como se hace en España. Para ello, deberá abordarse una reforma fiscal ambiental y del diseño de las tarifas eléctricas, tal y como recomendó el Grupo de Expertos para la Transición Energética, que se creó en 2017 por Acuerdo del Consejo de Ministros.

Sin embargo, si hay países que adoptan medidas y otros no, las industrias emisoras tendrán incentivos a reubicar su producción en los países que no las exijan, fenómeno conocido como «fuga de carbono». Como consecuencia, no se reducirán las emisiones globales y los países que adopten las medidas sufrirán una pérdida de PIB y empleo. Una solución consistiría en aplicar ajustes arancelarios en las fronteras. Las importaciones estarían gravadas según su «contenido en CO_2», con un cargo similar al soportado por los productores internos, mientras que las exportaciones recibirían un reintegro igual a lo que hubiesen pagado por el CO_2 emitido en la fabricación del producto.

La nueva Presidenta de la Comisión Europea ya ha anunciado que va a trabajar en esta dirección. El diseño de los ajustes no será sencillo, pues deberá ser compatible no solo con las reglas de la Organización Mundial del Comercio, sino también con las de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, incluyendo, para ello, mecanismos de compensación a los países menos desarrollados. Pero si se resuelve el problema de la fuga de carbono y la UE muestra que es posible descarbonizar con costes asumibles, será más fácil que EE.UU., China, India y otros países en desarrollo se sumen al proyecto y se alcancen consensos globales en la lucha contra el cambio climático. IyC

GETTY IMAGES/POGONICI/ISTOCK

por Pere Castells y Claudi Mans

Claudi Mans es catedrático emérito de ingeniería química de la Universidad de Barcelona y divulgador científico.

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es presidente del congreso mundial Science&Cooking.



Restaurantes sostenibles

La próxima revolución culinaria

El restaurante del futuro debería ser, obligatoriamente, sostenible. Esta es la sensación que se percibe en el panorama gastronómico, y que se ha visto aumentada por la irrupción de la pandemia de COVID-19. El año 2016, la Asociación Nacional de Restaurantes estadounidense ya afirmó que esta sería la tendencia principal durante el próximo decenio. ¿Qué elementos y procesos guiarán esta necesaria transformación del sector?

El elemento con mayor impacto en la sostenibilidad gastronómica es la materia prima, especialmente cuando procede de lugares distantes. Un restaurante sostenible debería utilizar productos de proximidad. Ello ahorraría energía de transporte, fomentaría la economía local, o regional, y potenciaría la recuperación o conservación de especies autóctonas.

Otro aspecto clave son los desperdicios, que deberían minimizarse. Ello obliga a crear estructuras de economía circular, esto es, que toda la materia que se elimina en el restaurante debería volver a poder ser utilizada de una u otra forma. En este sentido, debería estudiarse qué hacer con el rechazo: las pieles u otros desperdicios de la fruta podrían aprovecharse para nuevas elaboraciones o para obtener compost para el huerto del restaurante, de clientes o de proveedores. Asimismo, debería diseñarse una logística que evitara guardar la fruta en cámaras frigoríficas, con el propósito de reducir el consumo energético.

El reciclaje de envases parece una tarea más fácil, pero su aplicabilidad en la restauración ha demostrado ser compleja. Deben establecerse acuerdos con proveedores para evitar los recipientes desechables, en especial los de materia plástica. Lo ideal es diseñar una estructura de aprovisionamiento en la que se devuelva el recipiente para llenarlo de nuevo con el mismo tipo de producto (pescado, carnes, plantas, etcétera). Este planteamiento repercute en la economía del restaurante, ya que en la metodología tradicional se acumulan los envases y luego se evacúan en los contenedores adecuados, lo que consume espacio y tiempo del personal.

Otro aspecto fundamental para la sostenibilidad de un restaurante atañe a la gestión del agua y de la electricidad. El ahorro de agua es, y sobre todo será, imprescindible. Es necesario ir incorporando ya sistemas de recirculación del agua en la limpieza de los platos y del material de cocina. En cuanto a la electricidad, debe tenerse un plan de reducción de consumo en elementos de iluminación, con tendencia al uso de aparatos y luminarias de bajo consumo y estrategias de utilización de calores residuales como el de los hornos.



GETTY IMAGES/ZOFF-PHOTO/ISTOCK

Existen otros elementos cuyo impacto es, si bien indirecto, muy notable. Nos referimos a la elaboración diaria del menú, que debería priorizar las propuestas sostenibles, y a la selección del personal, que debería estar formado y sensibilizado con este tipo de restauración.

Seguramente abordar todos estos aspectos a la vez es complejo. Lo más recomendable es, por tanto, establecer retos factibles e irse auditando para constatar qué hitos se van consiguiendo.

Numerosos restaurantes de prestigio han iniciado ya el camino de la sostenibilidad. Relae (Copenhague) informa periódicamente de sus avances ambientales mediante un *Informe de sostenibilidad*. El Celler de Can Roca (Gerona) fomenta la economía circular al convertir en vajilla los envases de vidrio desechable. Captain's Galley (Escocia) tiene como prioridad cinco valores: sostenibilidad, estacionalidad, trazabilidad, simplicidad e integridad. Lluerna (Barcelona) ha introducido el reciclaje de recipientes con sus proveedores y el ahorro del agua. Paco Roncero (Madrid) ha construido un espacio de investigación sostenible. Azurmendi (Bilbao) ha reducido el consumo energético mediante la instalación de células fotovoltaicas. Edgewater (Chicago) tiene en la azotea un huerto con certificación ecológica. Chez Panisse (Berkeley) elabora su propia agua con gas. Nomad (Sídney) utiliza productos de mínima huella de carbono. Central (Lima) y, sobre todo, Mil (Cusco) relacionan la sostenibilidad con la identificación con su territorio. Y la lista sigue.

Lo importante es que aumente la conciencia de que avanzar en la senda de la sostenibilidad es muy positivo, porque, además de ser imprescindible ecológicamente, también repercute económicamente reduciendo costos. Y es a la vez una herramienta de *marketing*, pues mejora la imagen del establecimiento ante los clientes concienciados.

En un futuro, el agua, la electricidad y la recogida de basuras van a estar condicionadas por la cantidad, y, por tanto, algunos establecimientos serán inviables económicamente —y más después de la pandemia de COVID-19—. Si, además, se consolida la tendencia mundial de crear marcas de identidad reconocidas (del tipo «Restaurante ecológico»), la propuesta es clara: el restaurante sostenible no será una opción, sino, en la práctica, una obligación.

BOTÁNICA

NÁUFRAGOS EN LA ROCA: PLANTAS DE LOS SUELOS DE YESO



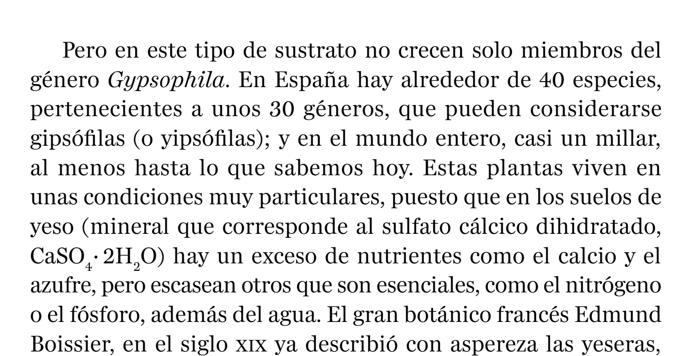


LOS PAISAJES DE YESOS, como estos de Calatayud, en Zaragoza, ofrecen un aspecto característico, con una vegetación rala donde predominan los pequeños arbustos, como el lino blanco (*en primer plano*) y algunas herbáceas de ciclo anual. Al fondo se alza el Castillo de Ayyub.

Los afloramientos de yeso constituyen islas con una flora muy diversa y especializada. Los mecanismos que despliegan las plantas para vivir en este ambiente hostil han fascinado desde hace tiempo a los científicos

Juan F. Mota Poveda, M. Encarna Merlo Calvente y Francisco J. Pérez García

Cae la tarde sobre una cantera de yeso en el almeriense desierto de Tabernas. Las sombras realzan los relieves de esta gigantesca cicatriz de piedra que evoca un cráter lunar. Sin actividad ya, abandonada hace varios años, no cabe esperar otra cosa que el silencio de un paisaje desolado, casi desprovisto de vida. Sin embargo, al atardecer, en los farallones del frente de la vieja cantera se recogen las chovas, ruidosas, como si se alegraran de volver a casa, a esos gigantescos escalones de roca lunar en los que anidan. Al pie de los cantiles, en la plaza de la cantera, también hay vida. Es una vida mucho más silenciosa. Allí, una planta domina con una tiranía aplastante: la jabonera, *Gypsophila struthium*, la reina del yeso. Fue precisamente la preferencia por el yeso de muchas de las especies que conforman el género *Gypsophila* lo que inspiró al naturalista sueco Carlos Linneo su nombre, que significa «amante del yeso» (*gypsum* es «yeso», y *phila*, «amante»).



Juan F. Mota Poveda, catedrático de la Universidad de Almería, centra sus investigaciones en la flora y la vegetación de sustratos especiales, como los yesos y las dolomías, y estudia medidas de conservación y restauración de estos ecosistemas.

M. Encarna Merlo Calvente, profesora de la Universidad de Almería, investiga la biodiversidad y la ecofisiología, entre otros aspectos, de la vegetación de suelos especiales, con miras a contribuir a su conservación.

Francisco J. Pérez García, investigador de la Universidad de Almería, estudia la flora de las montañas béticas y de los sustratos yesosos. Ha participado en la elaboración de una lista de plantas gipsófilas del mundo.

Pero en este tipo de sustrato no crecen solo miembros del género *Gypsophila*. En España hay alrededor de 40 especies, pertenecientes a unos 30 géneros, que pueden considerarse gipsófilas (o yipsófilas); y en el mundo entero, casi un millar, al menos hasta lo que sabemos hoy. Estas plantas viven en unas condiciones muy particulares, puesto que en los suelos de yeso (mineral que corresponde al sulfato cálcico dihidratado, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) hay un exceso de nutrientes como el calcio y el azufre, pero escasean otros que son esenciales, como el nitrógeno o el fósforo, además del agua. El gran botánico francés Edmund Boissier, en el siglo XIX ya describió con aspereza las yeseras, o aljezares: «Nada más triste como el aspecto de estos lugares estériles y totalmente privados de agua dulce».

Mayoritariamente, se trata de comunidades integradas por pequeños arbustos que no suelen superar el metro de altura. Presentan un aspecto ralo, con escasa vegetación herbácea, en la que predominan las gramíneas anuales y amacolladas. Cuando el yeso es consistente, las costras biológicas en la superficie del suelo rellenan casi al completo los espacios entre la vegetación.

A muchos investigadores nos fascinan los aljezares por la diversidad y la especialización de su flora, porque las plantas que crecen en ellos muestran adaptaciones asombrosas cuyo potencial por explorar es muy amplio. Más de un centenar de botánicos y ecólogos repartidos por todo el mundo investigamos estas comunidades vegetales para tratar de responder a varias preguntas: ¿cómo se las apañan las plantas para sobrevivir en un medio tan inhóspito? ¿A qué tipo de limitaciones nutricionales y edáficas deben hacer frente? ¿Cómo se originó y evolucionó la flora gipsófila en el mundo? ¿Qué estrategias de conservación deben seguirse para recuperar y proteger los aljezares más amenazados?

ISLAS RODEADAS DE TIERRA

Como ya se ha comentado, la gipsofilia es un fenómeno universal en el sentido de que puede reconocerse en cualquier parte del mundo, aunque es mucho más notorio en zonas áridas o semiáridas, entre ellas las regiones con extensas superficies de yeso en la región mediterránea, el Cuerno de África y el sudoeste de Asia y de Norteamérica.

No existe una correspondencia biunívoca entre los afloramientos de yeso y este tipo de floras, es decir, puede haber afloramientos de yeso sin que se presente una flora específica asociada. A pesar de ello, el efecto del yeso sobre la vegetación sí puede considerarse universal en la medida en que provoca la sustitución de unas comunidades por otras de naturaleza más xérica o, al menos, favorece la abundancia de plantas resistentes a la sequía.

La correspondencia entre el suelo y la flora gipsófila se hace aún más difusa cuando, junto al yeso, aparecen otras sales, especialmente el cloruro de sodio. La presencia de esta sal da paso a las especies halófilas, una situación muy frecuente en zonas áridas. En la a veces borrosa frontera entre la halofilia y la gipsofilia que se da en estos territorios aparecen un buen número de plantas que podemos considerar halogipsófilas, como las de los géneros *Limonium* o *Frankenia*.

Por otra parte, conviene aclarar que no todas las plantas capaces de crecer sobre el yeso son exclusivas de este tipo de suelo. Esta idea puede ilustrarse fácilmente comparando la abundancia de especies registrada en los afloramientos de yeso ibéricos —quizá los mejor documentados a escala mundial— a partir de diferentes fuentes de información. Así, entre las diez especies más frecuentes, seis no son estrictamente gipsófilas, entre ellas el esparto (*Stipa tenacissima*) y el romero (*Rosmarinus officinalis*). Las cuatro restantes sí lo son y las denominamos, por su alta representatividad en estos suelos, «las cuatro grandes»: la jabonera (*Gypsophila struthium*), el asnallo (*Ononis tridentata*), la jarilla escamosa (*Helianthemum squamatum*) y la hierba de las pecas (*Lepidium subulatum*).

Los afloramientos de yeso, igual que los de rocas ultramáficas (ricas en magnesio y hierro) y los de dolomías (ricas en magnesio y calcio), suelen ser discontinuos, es decir, se distribuyen a modo de isleos geológicos. De ahí que, cuando se estudian las floras de estos suelos especiales, se recurra a menudo al concepto de «islas en tierra». El mar estaría representado por los suelos, más comunes, que conforman los paisajes circundantes. Dado que el aislamiento promueve la especiación, es fácil entender la aparición de floras exclusivas o endémicas (edafoendemismos) en estos archipiélagos. Uno de los mejores ejemplos nos

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON CORTESÍA DE JUAN F. MOTA POVEDA

EN SÍNTESIS

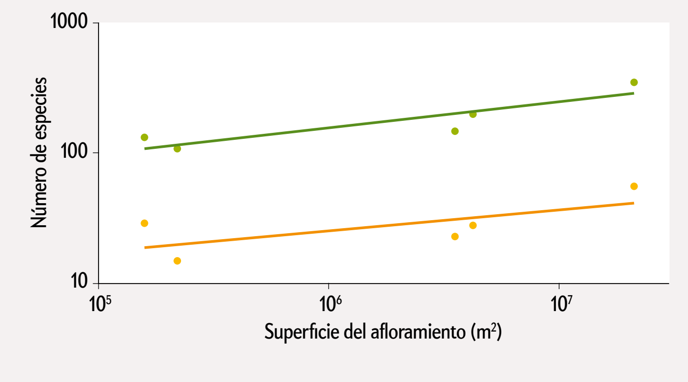
Los sustratos de yeso, con una distribución restringida en el mundo, constituyen ambientes muy hostiles para la vida debido a que presentan propiedades físicas y nutricionales muy desfavorables.

El carácter insular de estos sustratos y sus propiedades limitantes han dado lugar a la evolución de una flora específica y diversa, con plantas que presentan adaptaciones asombrosas.

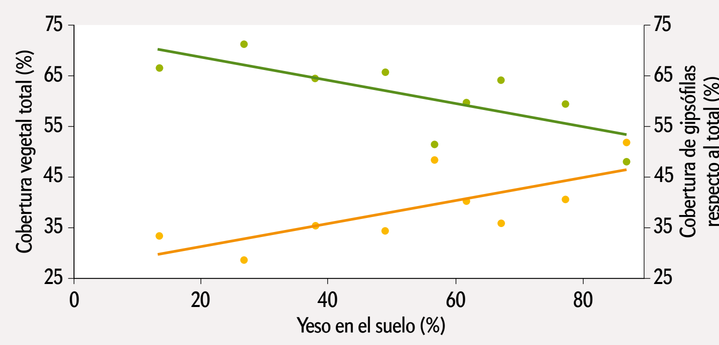
Conocer la composición de estas comunidades vegetales, el origen evolutivo de sus especies y los mecanismos que estas despliegan para crecer sobre el yeso son un paso clave para su conservación y gestión.

Preferencia por el yeso

Los sustratos de yeso, por su carácter insular y sus especiales propiedades físicas y químicas, constituyen ambientes poco idóneos para el crecimiento vegetal. Sin embargo, un grupo de especies, las plantas gipsófilas, han desarrollado una serie de adaptaciones que les permiten crecer con preferencia sobre ellos. Se ha observado así que aumentan su presencia cuanto mayor es el tamaño del afloramiento de yeso y cuanto mayor contenido de este mineral presenta el suelo.



El efecto del tamaño
En cinco afloramientos del sudeste de Almería (localizados, de mayor a menor superficie, en Sorbas, Venta de los Yesos, Cuevas de los Úbedas, Alfaro y Yesón Alto) se ha comprobado que al aumentar el tamaño del afloramiento también lo hace el número de las especies de plantas gipsófilas que se establecen en él (*naranja*), a la vez que el número de todas las especies (*verde*).



El efecto del yeso
La concentración de yeso del suelo influye negativamente en la cobertura total de las plantas de matorral que crecen sobre él (*verde*). Sin embargo, la proporción de la superficie ocupada por las especies gipsófilas respecto a al conjunto del matorral aumenta con la concentración del mineral (*naranja*).

lo ofrecen los poleos del yeso, que reúnen a varias especies del género *Teucrium*; cada uno de ellos es endémico de diferentes afloramientos de yeso del centro, este y sur de la península ibérica. Por decirlo de alguna manera, cada isla o grupo de islas tiene su propio «Robinson Crusoe».

Algunas características propias de estas comunidades vegetales derivan de su insularidad. Una de ellas es que se establece una relación entre la superficie total del afloramiento y el número de especies que crecen sobre él. Así lo hemos comprobado en afloramientos de yeso de distintos tamaños en la provincia de Almería, donde realizamos recuentos de especies en parcelas con una superficie estandarizada (1000 metros cuadrados): el número promedio de especies tiende a ser mayor en las parcelas emplazadas en una isla (afloramiento) grande que en las situadas en una pequeña. Por consiguiente, el tamaño del afloramiento es un factor que permite predecir su riqueza específica, un hecho matizado por su grado de aislamiento. Esta propiedad viene recogida en la denominada teoría biogeográfica de islas de MacArthur y Edward O. Wilson, propuesta inicialmente, en los años 60 del siglo pasado, para islas oceánicas. Según ella, el número de especies en una isla está determinado por dos factores clave: el tamaño de la isla y el grado de aislamiento (o distancia al continente fuente).

Pero ¿qué determina la distinta composición de las comunidades vegetales en estas islas respecto a las zonas de su alrededor? La investigación de la gipsofilia, cuyo artículo fundacional fue escrito en 1976 por Robert F. Parsons, de la Universidad La Trobe, en Melbourne, siempre ha recurrido a dos tipos de factores para explicar por qué ciertas plantas están adaptadas para crecer sobre los suelos yesíferos: los físicos y los químicos. Estos factores se han utilizado para plantear las dos hipótesis principales que existen sobre el origen de la gipsofilia: la hipótesis física y la hipótesis química.

OBSTÁCULOS FÍSICOS

Entre los factores físicos cabe destacar algunos rasgos habituales de estos suelos: la formación de costras en la superficie, el desarrollo de horizontes (capas) cementados a mayor profundidad, la escasa capacidad de retención de agua, y una estructura y textura desfavorables.

Las costras físicas son muy frecuentes en los claros de la vegetación de zonas áridas. Se producen por la destrucción de los agregados superficiales, que son muy pobres en materia orgánica y sufren el impacto de las gotas de lluvia y los sucesivos ciclos de humectación y sequía.

Estas costras, de superficie endurecida e hidrófobas, suponen un obstáculo para la germinación y la proliferación de nuevas plantas. En un estudio publicado en *Journal of Hidrology* en 2013, investigadores de la Estación Experimental de Aula Dei, del CSIC, en Zaragoza, examinaron la resistencia a la penetración de las costras por parte de las raíces. Compararon distintos tipos de suelos del valle del Ebro y observaron que los de alto





contenido en yeso mostraban una mayor resistencia que los de menor contenido.

De hecho, los impedimentos para la germinación y el establecimiento de plántulas a causa de las costras han sido utilizados como fundamento principal de la hipótesis física de la gipsofilia. Se argumenta que los denominados gipsófitos de amplia distribución (los mayor representados en todo el mundo) serían los únicos capaces de vencer esa barrera física, mientras que otros de distribución más restringida o incluso endémicos aprovecharían las islas de fertilidad creadas por los primeros para establecerse. También las aprovecharían las especies tolerantes al yeso (gipsovagas), aquellas que, aunque sin preferencia por este sustrato, pueden vivir sobre él.

A las costras físicas se suman las biopelículas, formadas por microorganismos edáficos (bacterias y algas), y las costras biológicas (formadas por líquenes y musgos), íntimamente asociadas al material mineral del suelo superficial. En este alfombrado biológico no es fácil encontrar un hueco donde las semillas germinen y las plántulas se establezcan. La abundancia y la cobertura de estas costras y biopelículas pueden llegar a prevalecer claramente sobre las de las plantas vasculares. Sin embargo, a medida que la investigación ha progresado, se ha puesto de manifiesto que en el ensamblaje de estas comunidades vegetales resultan fundamentales las interacciones de las plantas con las costras biológicas, en las que encuentran tanto microorganismos aliados como antagonistas. Por todo ello, las costras deben tenerse muy en cuenta a la hora de interpretar estos ecosistemas y representan, sin lugar a dudas, uno de sus rasgos principales.

Otra de las limitaciones que han servido para sostener la hipótesis física ha sido la escasa disponibilidad de agua útil para las plantas que hay en estos suelos. Para medir este agua se emplea la diferencia entre la capacidad de campo (cantidad de agua que puede retener un suelo tras el drenaje provocado por la gravedad) y el punto de marchitez permanente (cantidad de agua que queda retenida en el suelo con una fuerza de adsorción mayor que la fuerza de succión que ejercen las raíces de las plantas). En los suelos yesosos, ambos parámetros suelen mostrar valores superiores a los de otros tipos de suelo de zonas áridas. Sin embargo, la diferencia entre ellos, o agua útil, es similar, lo que contrasta con el aspecto de la vegetación, mucho más ralo en los suelos con yeso abundante. Por tanto, otros factores distintos del agua útil, relacionados con el comportamiento hídrico, podrían resultar determinantes.

Entre ellos figuran su menor sortividad (capacidad del suelo para absorber agua durante el proceso de humedecimiento) y conductividad hidráulica (capacidad de movimiento del agua una vez que esta ya está en el suelo).

También influye la peculiar microestructura de estos suelos, es decir, la distribución de sus microagregados, o grupos de partículas minerales y orgánicas. La microestructura puede verse afectada por ciclos de calcificación y descalcificación y por la redistribución de partículas finas y cristales de yeso, capaces de revestir y rellenar los poros.

Todos estos procesos pueden limitar el flujo de agua. Algunos de ellos son, además, responsables de otros rasgos singulares de estos suelos, como las queras, microestructuras huecas que aparecen casi siempre asociadas a restos de raíces. De hecho, sobre ellas se observan a menudo precipitados minerales que podrían afectar a su funcionalidad o provocar su deterioro.

A estos elementos de discusión se ha sumado la capacidad de algunas plantas o de los microorganismos de la rizosfera para emplear el agua estructural del yeso, con el consiguiente paso del sulfato de calcio dihidratado a una forma hemihidratada (basanita) y o anhidra (anhidrita). Se trata de procesos que podrían resultar clave en la interpretación de la gipsofilia y son una de las líneas de investigación más prometedoras en la actualidad.

ESTRATEGIAS NUTRICIONALES

Con respecto a la hipótesis química, investigaciones recientes han puesto de manifiesto la importancia de acercarse a la ionómica (composición mineral de los organismos) para entender la adaptación o la tolerancia de las plantas a los suelos yesosos. Estos se caracterizan por la abundancia de calcio y de azufre, y por la escasez de otros nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo. Cabría esperar que las plantas que crecen en este tipo de suelos presentaran concentraciones elevadas de los primeros y bajas de los segundos, pero no siempre es así, ya que los vegetales tienen la capacidad de regular la adquisición de estos nutrientes.

Varios autores han sugerido que las concentraciones elevadas de calcio en los tejidos vegetales podría ser un rasgo que permitiría distinguir las plantas gipsófilas de aquellas que





LAS PLANTAS GIPSÓFILAS crecen en exclusiva sobre los sustratos de yeso, un ambiente que la mayoría de las plantas no pueden soportar. Cuatro de las gipsófilas principales de la península ibérica son la jabonera (*Gypsophila struthium* a), la jarilla escamosa (*Helianthemum squamatum* b), el asnallo (*Ononis tridentata* c) y la hierba de las pecas (*Lepidium subulatum* d).

no lo son. La composición mineral de las hojas (y raíces) de *Ononis tridentata y Gypsophila struthium*, con valores por encima del 15 por ciento en algunos casos, parecen refrendar esta idea. En otras muchas especies consideradas gipsófilas, el contenido de calcio en los tejidos no suele superar el 3,5 por ciento, considerado este como el más alto de los valores normales. Sin embargo, varias plantas no gipsófilas superan este límite, entre ellas las del género *Sedum*, que se caracterizan por sus hojas suculentas.

El calcio interviene en múltiples funciones en las plantas, entre ellas la de regular el flujo de agua, tanto a través del apoplasto (los espacios entre las células) como del simplasto (el interior de las células). En el primer caso, porque contribuye a la estructura de la pared celular y a la apertura de los estomas (los poros de las hojas) y, en el segundo, porque participa en la activación de las acuaporinas, proteínas que regulan el flujo del agua a través de las membranas celulares. Esta regulación es determinante para la transpiración y, por consiguiente, para la adaptación a los climas áridos. No es de extrañar, pues, que la acumulación de calcio en forma de distintos compuestos, como oxalatos, se haya relacionado con la economía hídrica de la planta.

De hecho, Georgia Tooulakou, ahora en la Fundación para la Investigación y Tecnología Hellas, en Grecia, y sus colaboradores describieron en 2016, en *Plant Physiology*, que los cristales de oxalato de calcio en las hojas pueden actuar como una reserva bioquímica de carbono. Durante el día, la degradación de los cristales proporcionaría carbono para la fotosíntesis, lo que evitaría abrir los estomas para adquirirlo de la atmósfera. Esta estrategia metabólica, que se ha denominado «fotosíntesis de alarma», proporcionaría ventajas adaptativas relacionadas con la economía hídrica de las plantas, ya que minimizaría la pérdida agua que suele producirse por la evapotranspiración a través de los estomas.

El azufre también es un elemento muy abundante en los suelos yesosos. A diferencia del calcio, que también es dominante en otros tipos de suelo (calizas o dolomías), el azufre raramente se presenta en tan alta proporción en otros sustratos. De acuerdo con algunos investigadores, su elevada concentración en los tejidos vegetales podría emplearse como el mejor factor para discriminar cuándo una planta es gipsófila.

Sin embargo, el azufre no suele ser un factor limitante para el crecimiento de las plantas. A pesar de su abundancia en los suelos gípsicos, las plantas —con la excepción de las especies gipsófilas— raramente acumulan más de un 1 por ciento en las hojas. A partir de este valor, se considera que una planta es rica en azufre.

A pesar del gran protagonismo que tanto el calcio como el azufre han desempeñado a la hora de explicar la gipsofilia, ninguna especie de las estudiadas hasta ahora ha mostrado contenidos más elevados de estos dos macronutrientes en sus tejidos que los encontrados en el suelo. Pero con el magnesio ocurre todo lo contrario. Si aplicamos el criterio, expresado por muchos autores, de que una planta puede considerarse acumuladora de un mineral cuando sus tejidos concentran cantidades de este superiores a los totales del suelo, puede afirmarse que la mayoría de las plantas gipsófilas son acumuladoras de magnesio. Aunque se sabe que bajo estrés hídrico el metabolismo vegetal lleva a incrementar el contenido de este nutriente, tal aspecto ha sido poco estudiado en las plantas gipsófilas.

A la hora de interpretar la gipsofilia también resulta clave la disponibilidad de tres macronutrientes esenciales que están presentes en todos los abonos agrícolas: el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Mientras que el último no parece el principal responsable de la baja productividad de los aljezares, los dos primeros han atraído la mayor atención en la investigación sobre la gipsofilia. Un estudio de revisión que hemos realizado sobre su contenido en plantas de suelos sobre yesos (25 ibéricas y 44 norteamericanas) ha revelado que estas no sufren una clara deficiencia en nitrógeno, o al menos no solo en este elemento, sino también en fósforo.

Un índice que suele emplearse para estimar la disponibilidad de estos dos nutrientes es el cociente entre la concentración de

nitrógeno y la de fósforo. Así, una relación de entre 7 y 15 indica una limitación de nitrógeno, mientras que si es de entre 15 y 30, indica una limitación de fósforo. En la mayoría de tejidos de las plantas del estudio arriba mencionado, dicha relación siempre fue superior a 15 (con una excepción). De hecho, el valor promedio para las especies gipsófilas ibéricas fue de 28, y para las americanas, de 34. La mayoría de los datos indican, pues, que el fósforo sería el principal factor limitante de los suelos yesosos desde un punto de vista nutricional.

De hecho, esta tendencia se confirma cuando se miden los contenidos de fósforo en el suelo. Mientras que la concentración promedio mundial de este elemento varía de 400 a 1200 miligramos por kilogramo de suelo, los datos de los que disponemos para las zonas de yeso de la península ibérica arrojan valores por debajo de 100 miligramos y, casi siempre, muy alejados de los 400 miligramos.

A la escasez de fósforo del suelo hay que sumar el hecho de que el calcio, muy abundante en estos suelos, reacciona y forma precipitados con él, lo que da lugar a fosfatos de calcio, que son muy insolubles. Como resultado, el fósforo queda inmovilizado y deja de estar disponible para los vegetales. Algunas plantas, con la ayuda de la microbiota asociada a las raíces (rizosfera), han desarrollado mecanismos para acceder a este nutriente: segregan ácidos orgánicos, entre ellos aniones carboxílicos, que provocan, localmente, la acidificación del suelo y, como consecuencia, la solubilización del fósforo. Los citratos y los oxalatos liberados por las raíces también se han demostrado bastante efectivos en esta función y, además, pueden actuar como quelantes: atrapan en su estructura molecular el fósforo y el conjunto puede ser absorbido por las raíces. Hasta el momento, no se ha confirmado esta última facultad en las plantas gipsófilas, aunque la abundancia de oxalato en las raíces de algunas de ellas hace sospechar su existencia. La investigación sobre el papel de las raíces en la solubilización del fósforo resulta clave para comprender la adaptación de las plantas a este tipo de suelos.



LAS COSTRAS BIOLÓGICAS, como esta constituida sobre todo por líquenes, llegan a ocupar gran parte de la superficie de los sustratos de yeso. A menudo suponen un obstáculo para la germinación y el establecimiento de las plantas superiores.

¿CÓMO SURGIÓ LA GIPSOFILIA?

Mientras que la vegetación de los sustratos de yeso ha sido estudiada en distintas regiones del planeta y se han propuesto hipótesis para interpretar la gipsofilia, apenas existen estudios globales que expliquen el origen evolutivo y la distribución en el mundo de esta peculiar flora.

Una revisión preliminar realizada por nuestro grupo revela claramente que una abrumadora mayoría de estas especies se concentra en un número reducido de clados, o grupos filogenéticos. El hecho de que se reúnan en unos pocos grupos en los diferentes continentes confirma su preadaptación a estos ambientes tan severos y únicos.

Uno de los grandes clados es el de las Cariofilales, con un par de familias, Cariofiláceas y Quenopodiáceas, en las que se incluye una treintena de especies gipsófilas. A este clado pertenecen también las Nictagináceas, muy frecuentes en el desierto de Chihuahua. Otro clado, el de las Fábidas, comprende varias familias, entre ellas las Fabáceas (legumbres y afines). También destaca el clado de las Málvidas, con algunas familias muy relacionadas entre sí: Resedáceas, Caparáceas y Brasicáceas. Un último gran clado es el de las Astéridas, que incluye las familias de las Asteráceas (o plantas compuestas), Lamiáceas, Plantagináceas, Namáceas y Boragináceas.

Nuestros análisis filogenéticos confirman la aparición reiterada e independiente de plantas adaptadas a los suelos yesosos dentro de una misma familia o género. En el caso de la flora española podrían mencionarse diversas especies de los géneros *Helianthemum*, *Chaenorrhinum* o *Gypsophila*, este último con una distribución mundial mucho más amplia.

Los estudios de datación molecular disponibles hasta la fecha indican que muchos de los linajes gipsófilos habrían aparecido en todo el mundo durante el Mioceno tardío (hace entre unos 8 y 5,3 millones de años). En este sentido, se ha demostrado que los dos eventos que originaron la gipsofilia en un subgénero de *Tiquilia*, planta del desierto de Chihuahua, se remonta probablemente al Plioceno temprano y al Pleistoceno de temprano a medio (períodos inmediatamente posteriores al Mioceno). Estas pruebas coinciden bastante bien con la separación entre *Ononis tridentata* (un gipsófito de la región mediterránea occidental) y *O. fruticosa*, que se sitúa en torno a los 5,1 millones de años.

Aunque las floras gipsófilas actuales parecen haberse conformado gradualmente en los últimos millones de años, en los que han coexistido linajes antiguos con otros más jóvenes, es pronto para generalizar este patrón. Hay que tener en cuenta que existen amplias áreas yesosas por todo el planeta que son anteriores a los períodos geológicos aludidos, por lo que podrían conservar elementos relictos aún no suficientemente estudiados.

RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

Numerosas amenazas pesan sobre las comunidades vegetales de suelos yesosos, entre ellas, el cambio climático y la fragmentación del hábitat. Otro impacto importante son las explotaciones de yeso. No es casualidad que muchos de los países explotadores de este mineral sean también los que albergan las floras gipsófilas de mayor interés. España es uno de





EN LAS CANTERAS DE YESO ABANDONADAS se observa con frecuencia un fenómeno ecológico singular: las plántulas de la jabonera (*Gypsophila*) se instalan desde el principio sobre el suelo esquelético (*derecha*), y lo hacen casi en exclusiva, sin la intermediación de especies herbáceas de ciclos biológicos más cortos.

ellos. La provincia de Almería, por ejemplo, presenta algunas de las canteras de yeso de mayor extensión y productividad del mundo, como las que rodean el paraje natural del Karst en Yesos de Sorbas. Afortunadamente, este espacio protegido recoge una extraordinaria representación de estos ecosistemas.

Las explotaciones a cielo abierto deben ser restauradas convenientemente, sobre la base de criterios científicos. El empleo del yeso como sustrato resulta un paso previo esencial para el desarrollo de las plantas, en lugar de añadir otros tipos de sustrato, como abonos, que pretenden mejorar la productividad biológica. En este sentido, la restauración ecológica inspirada en la biomímesis (los procesos que se producen de forma natural) es la única alternativa aceptable. Además, hay que tener en cuenta que estos hábitats son prioritarios para la Unión Europea, según establece la Directiva Hábitats. Las propias canteras cuya explotación se abandonó hace muchos años ofrecen ideas para ese tipo de restauración. En ellas se ha estudiado la sucesión vegetal y se ha puesto de manifiesto la gran resiliencia que exhiben estos sistemas.

Se trata de una sucesión primaria, autógena y directa, un acontecimiento mucho más infrecuente en nuestro planeta que la sucesión secundaria (la que se produce tras perturbaciones como los incendios o el abandono de los campos de cultivo). En la sucesión primaria, a diferencia de la secundaria, el suelo carece de «memoria», representada por el banco de semillas y los propágulos enterrados. Por consiguiente, los nuevos «inquilinos» siempre proceden de las zonas circundantes.

Los manuales de ecología dicen que los primeros habitantes en las sucesiones primarias son cianobacterias, algas, líquenes y musgos que pueden crecer en sustratos esqueléticos y sin nutrientes. Estos pioneros, al degradar la roca y aportar su propia materia orgánica y nutrientes, facilitarían la entrada de otras especies. Las plantas anuales, con ciclos biológicos efímeros, darían paso a las hierbas perennes y finalmente, a arbustos y árboles.

Sin embargo, en las plazas de las canteras de yeso abandonadas, un género de plantas, *Gypsophila*, parecen empeñadas en poner patas arriba los manuales de ecología. Como si la roca de yeso estuviera esterilizada para cualquier otra planta, las jaboneras no solo acompañan a cianobacterias, algas, líquenes y musgos desde el principio, sino que lo hacen casi en exclusiva, lo cual conduce a una sucesión directa, esto es, sin la intermediación de especies herbáceas de ciclos biológicos más cortos. Este fenómeno, que se produce siempre que hay alguna especie de este género presente, se ha observado por toda la geografía española, desde el valle del Ebro hasta Almería y también en Turquía.

Volvamos a la cantera de yeso, donde la jabonera pone contra las cuerdas la teoría ecológica con su comportamiento, a la vez tolerante al estrés y con una gran capacidad proliferativa. Allí, la reina del yeso, como las chovas, aprovecha una gigantesca oportunidad, un cráter casi meteorítico. En el silencio de la cantera almeriense, la naturaleza regresa y no parece necesitarnos, aunque la humanidad se convenza de lo contrario y olvide las palabras de Bacon de hace cuatro siglos: *Natura non nisi parendo vincitur* («A la naturaleza solo se la domina obedeciéndola»). IyC

PARA SABER MÁS

Vegetation and soil recovery on gypsum outcrops in semi-arid Spain. Elías D. Dana y Juan F. Mota en *Journal of Arid Environments*, vol. 65, n.º 3, págs. 444-459, mayo de 2006.

The ecology, assembly, and evolution of gypsophile floras. Michael Moore et al. en *Plant Ecology and Evolution in Harsh Environments*. Nishanta Rajakaruna et al. (eds.), *Nova Science Publishers*, págs. 97-128, noviembre de 2014.

Plant life on gypsum: a review of its multiple facets. Adrián Escudero et al. en *Biological Reviews*, vol. 90, n.º 1, págs. 1-18, febrero de 2015.

The edaphism: Gypsum, dolomite and serpentine flora and vegetation. Juan F. Mota et al. en *The Vegetation of the Iberian Peninsula*. Dirigido por Javier Loidi, vol. 2, págs. 277-354. Springer, 2017.

A first inventory of gypsum flora in the palearctic and Australia. Francisco J. Pérez-García et al. en *Mediterranean Botany*, vol. 39, n.º 1, págs. 35-49, febrero de 2018.

Threshold ionic contents for defining the nutritional strategies of gypsophile flora. M. Encarna Merlo et al. en *Ecological Indicators*, vol. 97, págs. 247-259, febrero de 2019.


BUZELLI

Richard Montgomery es catedrático de matemáticas en la Universidad de California en Santa Cruz. Su investigación se centra en el problema de los *N* cuerpos y la geometría de las distribuciones.

MATEMÁTICAS

El problema de los tres cuerpos

Aunque los matemáticos saben que nunca podrán resolver completamente este problema centenario, han realizado algunos descubrimientos fascinantes abordando pequeñas partes del mismo

Richard Montgomery

Ilustración de Chris Buzelli

Corría la primavera de 2014 y yo casi me había dado por vencido con el problema de los tres cuerpos. Sin ideas, comencé a programar en mi portátil con la idea de generar y examinar soluciones aproximadas. Esa estrategia no resolvería mi problema, pero quizá me proporcionara algunas pistas valiosas. Sin embargo, mi escasa pericia como programador y la impaciencia resultante ralentizaron el proceso y lo convirtieron en una experiencia desagradable para un matemático como yo, acostumbrado a trabajar con lápiz y papel. Así que contacté con mi viejo amigo Carles Simó, catedrático en la Universidad de Barcelona, para convencerlo de que me ayudara con mis torpes pesquisas.

EN SÍNTESIS

Uno de los problemas más antiguos en matemáticas y física es el de los tres cuerpos: ¿cómo se moverán en el futuro tres objetos mutuamente atraídos por su gravedad, dadas sus posiciones y velocidades actuales?

Isaac Newton fue el primero en plantear el problema. Más tarde se demostró que era irresoluble: en general es imposible encontrar una fórmula que prediga exactamente las órbitas de los tres cuerpos.

No obstante, los investigadores han hallado soluciones interesantes para algunos casos concretos. El estudio del problema de los tres cuerpos les ha permitido descubrir nuevos y fascinantes principios matemáticos.

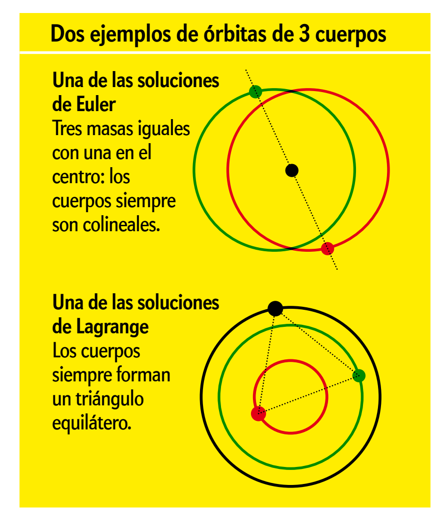
Ese otoño viajé a España para encontrarme con Simó, considerado uno de los analistas numéricos más ingeniosos y meticulosos en el campo de la mecánica celeste. Simó, además, es una persona directa que no pierde el tiempo ni se anda con rodeos. Tras exponerle mi duda, me miró con ojos penetrantes y preguntó: «Richard, ¿por qué te importa esto?».

La respuesta se remonta a los orígenes del problema de los tres cuerpos. Isaac Newton planteó y resolvió el problema (más sencillo) de los dos cuerpos en 1687, cuando publicó sus *Principia*. Se preguntó: «¿Cómo se moverán dos masas en el espacio si la única fuerza que experimentan es su mutua atracción gravitatoria?». Newton formuló el problema mediante un sistema de ecuaciones diferenciales —las cuales dictan el movimiento futuro de un objeto a partir de su posición y velocidad en un momento dado— y las resolvió completamente. En las soluciones, también llamadas órbitas, cada objeto describe una cónica (un círculo, una elipse, una parábola o una hipérbola). Al encontrar todas las posibles órbitas, Newton derivó las leyes empíricas del movimiento planetario que Johannes Kepler había publicado en 1609 y que sintetizaban decenios de observaciones astronómicas de su difunto patrono, Tycho Brahe.



La primera ley de Kepler dice que cada planeta (o cometa) se mueve a lo largo de una cónica que tiene el Sol como foco. Sin embargo, en las soluciones de Newton los dos cuerpos (el Sol y el planeta) describen cónicas distintas, con un foco común que coincide con el centro de masas de ambos cuerpos. Pero como el Sol es mucho más masivo que cualquier planeta, el centro de masas del sistema Sol-planeta se sitúa dentro de la estrella, muy cerca de su propio centro de masas; en consecuencia, este apenas se bambolea alrededor del centro de masas común, trazando una elipse muy pequeña.

Si consideramos tres masas en lugar de dos, tendremos el problema de los tres cuerpos. Las órbitas son de nuevo las soluciones de un sistema de ecuaciones diferenciales, pero en este caso resulta difícil o imposible encontrar fórmulas explícitas para ellas. Hasta la fecha, a pesar de los potentes ordenadores modernos y los siglos de trabajo de brillantes matemáticos y físicos, solo disponemos de fórmulas explícitas para cinco familias de órbitas, tres de ellas halladas por Leonhard Euler (en 1767) y dos por Joseph-Louis Lagrange (en 1772).



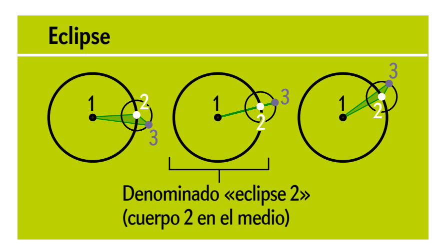
En 1890, Henri Poincaré descubrió comportamiento caótico en el problema de los tres cuerpos, lo que implica que nunca podremos conocer todas sus soluciones con un detalle ni remotamente similar al de la solución completa de Newton para el problema de los dos cuerpos. Sin embargo, es posible generar segmentos finitos de órbitas aproximadas mediante la integración numérica, un procedimiento que los ordenadores realizan de manera eficaz y que resulta esencial en la planificación de misiones espaciales. Incrementando el tiempo de ejecución de nuestro algoritmo, podemos obtener aproximaciones tan precisas como queramos.

ECLIPSES

Las palabras de Simó me dejaron sin aliento. «Claro que me importa», pensé. «¡Llevo casi veinte años trabajando en este problema!» En realidad, me había centrado en una pregunta concreta:

¿Toda secuencia periódica de eclipses es la secuencia de eclipses de alguna solución periódica al problema plano de los tres cuerpos?

Me explico. Imaginemos tres cuerpos (por ejemplo, estrellas o planetas) que se mueven en un plano y se atraen gravitatoriamente entre sí. Numeremos los cuerpos del uno al tres. De vez en cuando, los tres se alinearán. Pensemos en esos momentos como eclipses (aunque técnicamente se denominan «sizigias»). A medida que pasa el tiempo, registremos cada eclipse que acontezca, etiquetándolo como uno, dos o tres según la estrella que esté en medio. El resultado es una lista de unos, doses y treses llamada secuencia de eclipses.



Por ejemplo, en una versión simplificada de nuestro sistema Sol-Tierra-Luna, la Luna (que será nuestro cuerpo 3) describe un círculo alrededor de la Tierra (el cuerpo 2) cada mes, mientras que nuestro planeta hace lo propio alrededor del Sol (el cuerpo 1) una vez al año. Ese movimiento es repetitivo, así que generará una secuencia de eclipses periódica, en concreto 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3. En la secuencia no hay ningún 1 porque el Sol nunca está entre la Tierra y la Luna. En un año, la lista consta de 24 números, con un par 2, 3 por cada uno de los 12 meses.

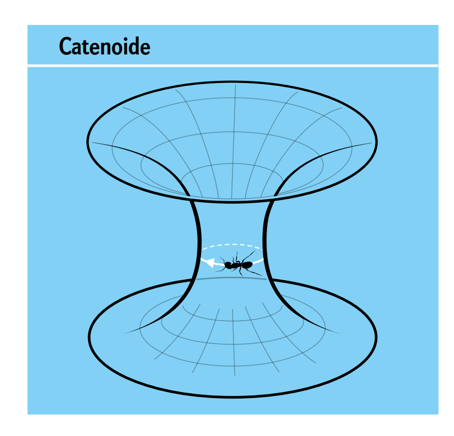
La secuencia de eclipses de una solución no tiene por qué ser periódica: podría seguir y seguir sin ninguna pauta. Pero si la solución se repite exactamente tras un cierto período de tiempo, como ocurre con el sistema Sol-Tierra-Luna al cabo de un año, la secuencia también se repetirá: en nuestro ejemplo, cada año tendremos los mismos 24 números. Así que, volviendo a mi pregunta: ¿toda secuencia periódica de eclipses es la secuencia de eclipses de alguna solución periódica al problema plano de los tres cuerpos? Sospechaba que la respuesta era afirmativa, pero no era capaz de demostrarlo.

OBJETOS AGUJEREADOS

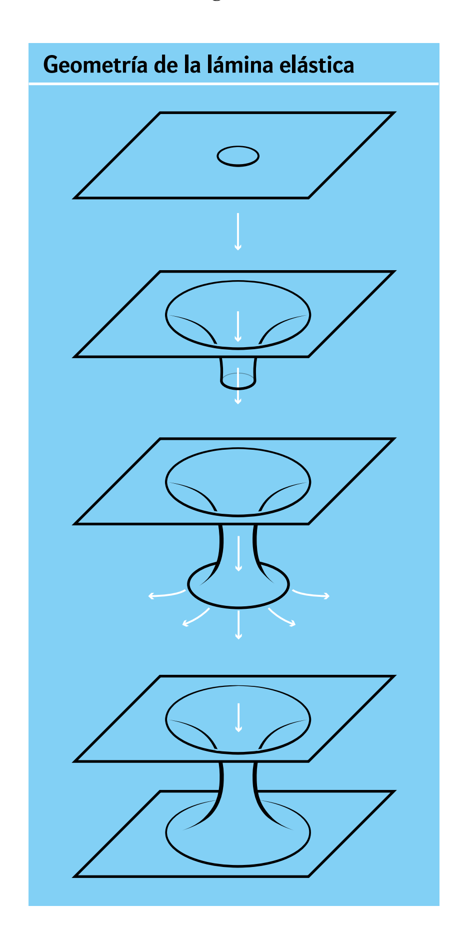
Para hacerle ver a Simó la importancia de mi pregunta, le recordé un hecho básico

ILUSTRACIONES DE NIGEL HAWTIN

que conecta tres ramas de las matemáticas: la topología, a veces denominada geometría de la lámina elástica; la geometría de Riemann, que estudia las superficies curvadas; y la dinámica, que se ocupa de cómo se mueven las cosas. Imaginemos un insecto que camina sobre una superficie curvada con forma de «agujero de gusano», también llamada catenoide, con el objetivo de encontrar el camino más corto alrededor del agujero.

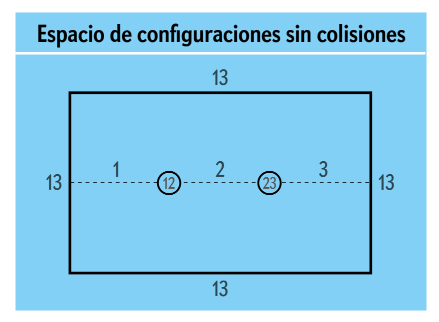


Topológicamente, la catenoide equivale al plano xy con un agujero. En efecto, imaginemos que perforamos un agujero en una lámina de goma elástica.



Empujándolo hacia abajo y estirándolo hacia afuera, podemos construir la catenoide. Si hemos ensanchado suficientemente el agujero, entonces no solo existe ese camino más corto, sino que además satisface una ecuación diferencial muy parecida a las del problema de los tres cuerpos. De este modo, nuestro insecto habrá encontrado una solución periódica de una ecuación diferencial interesante.

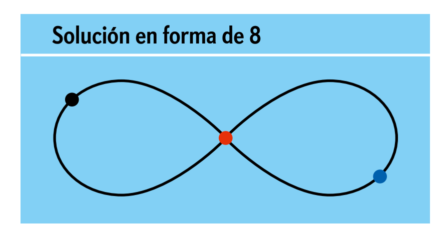
En el problema de los tres cuerpos, el papel de la catenoide lo desempeña el llamado espacio de configuraciones, cuyos puntos representan simultáneamente las posiciones de los tres cuerpos. Por consiguiente, una curva en ese espacio especifica el movimiento de cada uno de los tres cuerpos. Para impedir que los objetos puedan chocar uno contra otro, perforamos agujeros en el espacio de configuraciones. Como veremos, desde la óptica de la topología, ese espacio de configuraciones sin colisiones equivale al plano xy con dos agujeros.



Llamaremos 12 al agujero que representa el choque entre los cuerpos 1 y 2, y 23 al que simboliza la colisión entre 2 y 3, y los situaremos sobre el eje x. También pondremos un tercer agujero 13 en el infinito, para describir el encuentro de los cuerpos 1 y 3. Dichos agujeros dividen el eje x en tres segmentos denotados por 1, 2 y 3. Una curva en este plano perforado dos veces representa un movimiento de los tres objetos, es decir, una posible solución al problema de los tres cuerpos. Cuando la curva corta el segmento 1, se produce un eclipse de tipo 1, y lo mismo ocurre con los segmentos 2 y 3. Así pues, una secuencia de eclipses no es más que una forma de serpentear alrededor de los agujeros que representan las colisiones.

Recordemos que nuestro insecto trataba de minimizar la longitud de su trayectoria al dar una vuelta alrededor del agujero de gusano. Para poder establecer una analogía entre el problema del insecto y el de los tres cuerpos, debemos reemplazar esa longitud por una cantidad conocida como la acción de la trayectoria. (La acción es una especie de promedio de la energía cinética menos la energía potencial para el movimiento representado por la trayectoria.) Un teorema centenario de la mecánica afirma que cualquier curva del espacio de configuraciones que minimice la acción es una solución del problema de los tres cuerpos de Newton. Por lo tanto, podemos intentar resolver nuestro problema sobre la secuencia de eclipses buscando los caminos que minimizan la acción entre todos aquellos que producen una determinada secuencia de eclipses.

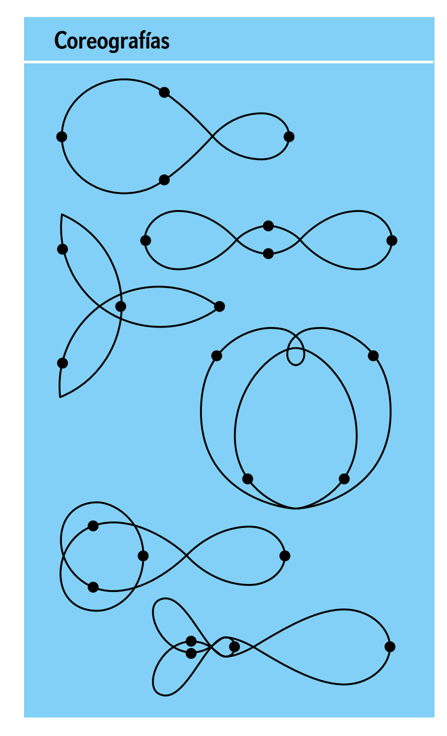
Esa estrategia me había tenido ocupado durante la mayor parte de los últimos 17 años y me había procurado muchos resultados interesantes. Por ejemplo, en el año 2000 redescubrí junto a Alain Chenciner, de la Universidad Diderot de París, la primera solución periódica con momento angular nulo que se obtuvo para el problema de los tres cuerpos. Se trataba de una órbita en forma de ocho hallada en 1993 por Cris Moore, del Instituto de Santa Fe, en Nuevo México.



Esta solución corresponde a tres masas iguales que se persiguen entre sí y describen un ocho sobre el plano. Su secuencia de eclipses es 123123, repetida una y otra vez. Nuestro trabajo popularizó la figura en forma de ocho y proporcionó una prueba rigurosa de su existencia. También condujo al descubrimiento de muchas nuevas órbitas para el problema de los N cuerpos de igual masa, bautizadas como «coreografías» por Simó, que encontró cientos de ellas.

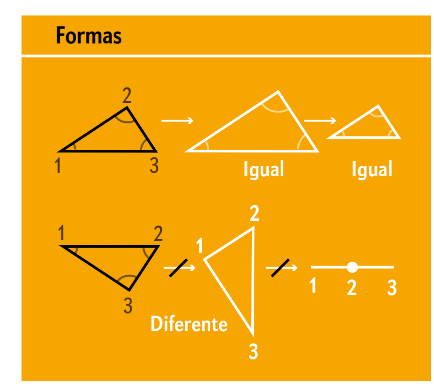
Nuestra solución en forma de ocho incluso apareció en una exitosa novela china de ciencia ficción, escrita por Cixin Liu y traducida al español como *El problema de los tres cuerpos*.

A la mañana siguiente de haber compartido mis reflexiones con Simó, este dijo algo que me influyó profundamente. «Richard, si estás en lo cierto, tiene que existir un mecanismo dinámico.» En otras palabras, si la respuesta a mi pregunta era afirmativa, debía ser por algo relacionado con la manera en que se movían los cuerpos.

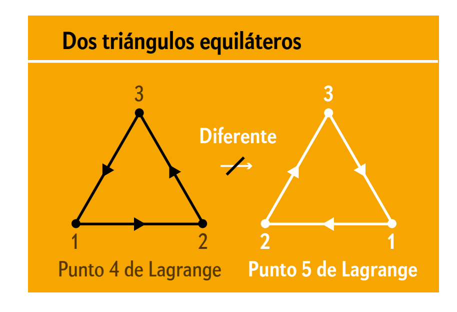


trar la posición de cada vértice, fijémonos solo en la forma general del triángulo. El resultado es una curva sobre la esfera de formas, cuyos puntos representan «formas» de triángulos.

Pero ¿qué es una forma? Dos figuras del plano tienen la misma forma si podemos transformar una en la otra mediante una traslación, rotación o ampliación (o reducción).



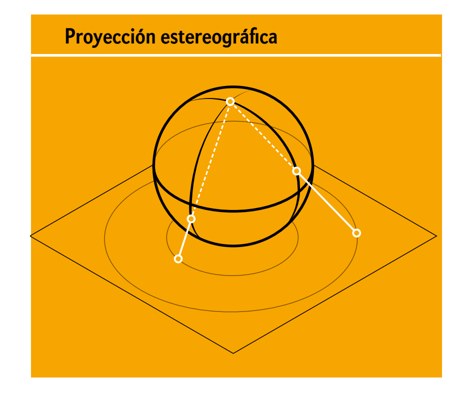
del plano sí transforma una de las formas en la otra.



Dicha operación actúa sobre todos los triángulos y, por ende, sobre la propia esfera de formas: su efecto es una reflexión respecto al ecuador, que mantiene fijos los puntos del mismo (los triángulos degenerados) e intercambia los hemisferios norte y sur.

Entre los triángulos degenerados se encuentran las colisiones binarias: aquellos «triángulos» en que dos de los tres vértices coinciden. Hay exactamente tres de ellos, denotados por 12, 23 y 13, según los dos vértices que se superpongan.

Ahora ya podemos explicar por qué la esfera de formas muestra que el espacio de configuraciones de los tres cuerpos es topológicamente equivalente al plano xy menos dos puntos. Necesitamos saber que, desde el punto de vista topológico, la esfera menos un único punto es el mismo objeto que el plano xy. Una forma de verlo es usar la proyección estereográfica, que transforma la esfera menos un punto (el foco o fuente de luz, que en la siguiente ilustración coincide con el polo norte de la esfera) en el plano xy habitual.



Si consideramos puntos de la esfera cada vez más cercanos al foco, su imagen sobre el plano xy se va desplazando hacia el infinito, por lo que también podemos decir que el plano con un punto adicional en el infinito es topológicamente equivalente a la esfera. Supongamos que la

Esas pocas palabras me llevaron a cuestionar mis convicciones y a abandonar la estrategia basada en minimizar la acción de las trayectorias que había seguido durante 17 años. ¿Qué mecanismos dinámicos de este problema soy siquiera capaz de identificar?, me pregunté. Se me ocurrían dos, y solo uno de ellos ofrecía esperanzas. Ese mecanismo, relacionado con el caos descubierto por Poincaré, me hizo reflexionar sobre el antiguo trabajo de uno de mis colaboradores más recientes, Rick Moeckel, de la Universidad de Minnesota. En la década de 1980, Moeckel había demostrado que unas curvas llamadas enredos hiperbólicos, que surgen a partir de las colisiones triples en el problema de los tres cuerpos, pueden conducir a resultados sorprendentes. Al releer sus viejos artículos, me pareció que Moeckel podía tener la clave para resolver mi problema. Me puse en contacto con él, y en unos pocos días habíamos logrado responder a mi pregunta. Bueno, casi: habíamos contestado una cuestión infinitamente parecida.

LA ESFERA DE FORMAS

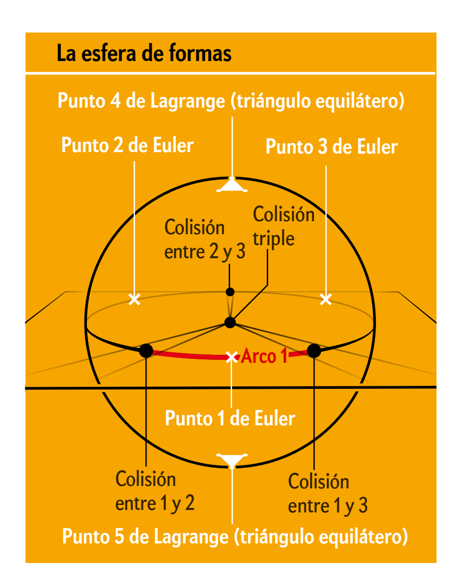
Para entender el mecanismo dinámico de Moeckel, y también la relación que hemos mencionado entre el espacio de configuraciones del problema de los tres cuerpos y el plano con dos agujeros, necesitamos pensar en la denominada esfera de formas. Al moverse en el plano, los tres objetos constituyen en cada instante los vértices de un triángulo. En vez de regis-

Pasar del espacio de configuraciones de los tres cuerpos (es decir, de conocer las posiciones de los tres vértices de un triángulo) a un punto en la esfera de formas implica olvidar información sobre el tamaño del triángulo, su orientación en el plano y la ubicación de su centro de masas. Es fácil comprender que la esfera de formas es una superficie bidimensional: la forma de un triángulo queda determinada por sus tres ángulos, pero dado que estos siempre suman 180 grados, en realidad solo necesitamos dos de ellos. Por lo tanto, dos números bastan para especificar la forma de un triángulo. Entender por qué la esfera de formas es realmente una esfera es más difícil y requiere que aceptemos la posibilidad de tener triángulos degenerados, con sus tres vértices sobre una misma línea. Estos «triángulos» degenerados de área nula forman el ecuador de la esfera de formas: son los eclipses.

El área de un triángulo dividida por el cuadrado de su tamaño (que llamaremos r y definiremos más adelante) es su distancia al ecuador. Los polos norte y sur de la esfera de formas representan los triángulos de área máxima y son las dos posibles formas de triángulo equilátero, que difieren en el orden cíclico de sus vértices. No hay manera de convertir uno de estos triángulos equiláteros en el otro mediante una rotación, traslación o ampliación, de modo que representan formas distintas. Sin embargo, la reflexión respecto a una línea cualquiera

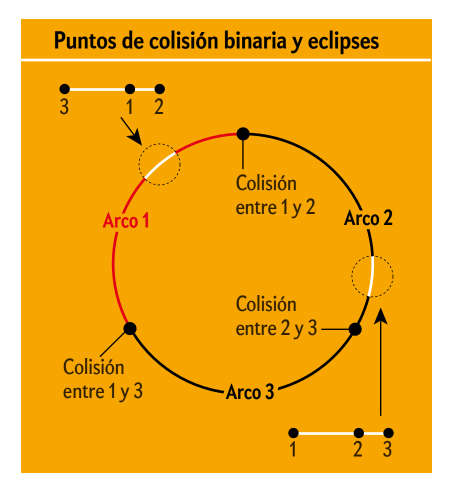
fuente de luz se encuentra en el punto de colisión binaria 13 de la esfera de formas, de modo que el punto en el infinito del plano xy corresponda a dicho punto 13. Orientemos la esfera de manera que su plano ecuatorial contenga al eje x del plano xy. Entonces, la proyección estereográfica llevará el ecuador de los triángulos degenerados al eje x del plano, y los otros dos puntos de colisión binaria a dos puntos del eje x. Así obtenemos justo la equivalencia que buscábamos.

Los tres puntos de colisión binaria constituyen tres puntos especiales de la esfera de formas. Además, hay otros cinco puntos especiales: las llamadas configuraciones centrales, que corresponden a las cinco familias de soluciones descubiertas por Euler y Lagrange. Estas soluciones al problema de los tres cuerpos son las únicas para las que la forma del triángulo no cambia a medida que este evoluciona. En las soluciones de Lagrange, el triángulo siempre es equilátero; como hemos visto, hay dos de estas configuraciones, que constituyen los polos norte y sur de la esfera de formas. Las denominaremos puntos 4 y 5 de Lagrange.



Las otras tres configuraciones centrales son las de Euler, y nos referiremos a ellas como puntos 1, 2 y 3 de Euler. Se trata de configuraciones degeneradas colineales (los tres cuerpos están alineados), por lo que se sitúan sobre el ecuador de la esfera de formas, entre los tres puntos de colisión binaria; sus posiciones exactas vienen determinadas por las relaciones entre las masas de los tres cuerpos.

El punto 1 de Euler, por ejemplo, se encuentra en el arco ecuatorial 1, así que es una forma colineal con el cuerpo 1 entre los cuerpos 2 y 3. (Es relativamente frecuente referirse a las cinco configuraciones centrales como puntos de Lagrange, y entonces los puntos de Euler se designan mediante L1, L2 y L3.)



Para entender mejor las soluciones asociadas a las configuraciones centrales, podemos imaginar que los tres cuerpos comienzan en reposo, sin ninguna velocidad inicial. En esta situación de «caída libre», suelen ocurrir todo tipo de cosas extrañas: colisiones binarias, alocadas danzas y quizá la huida de uno de los cuerpos al infinito. Pero si soltamos los tres cuerpos cuando están dispuestos en una de las cinco configuraciones centrales, el triángulo que forman simplemente se reducirá a un punto, conservando la misma forma con que comenzó: las tres masas tiran uniformemente las unas de las otras hasta que la solución acaba en una colisión triple simultánea.

Cinco vías hacia la colisión triple

La colisión triple constituye una singularidad esencial dentro del problema de los tres cuerpos, algo así como una «gran explosión» (*big bang*) en el centro del problema, y es la fuente de gran parte de su caos y complejidad. A principios del siglo xx, el matemático finlandés Karl Sundman demostró que las cinco configuraciones centrales, representadas por las soluciones de caída libre que acabamos de describir, son las únicas vías que conducen a la colisión triple. Eso significa que cualquier solución que acabe en una colisión triple ha de aproximarse a ella de manera muy similar a una de esas cinco soluciones; a medida que se acerca más y más a la colisión triple, la forma de la solución se va aproximando a una de las cinco configuraciones centrales.

El trabajo de Sundman supuso una complicada gesta algebraica y analítica. El año que terminé el instituto (completamente ajeno al problema de los tres cuerpos), el matemático estadounidense Richard McGehee introdujo una técnica conocida como «explosión» (*blow up*) que permitió entender el trabajo de Sundman de manera gráfica y estudiar la dinámica cerca de la colisión triple con mucho más detalle. Sea r la distancia a la colisión triple (una medida del tamaño de un triángulo). Las ecuaciones de Newton no se comportan bien cuando r se aproxima a cero, y muchos de sus términos tienden a infinito. McGehee encontró un cambio para las variables del espacio de configuraciones y el tiempo que ralentiza la aproximación a la colisión triple y transforma el punto de colisión triple, $r = 0$, en toda una colección de puntos: la variedad de colisión. Y ¡sorpresa! Esta variedad es, en esencia, la esfera de formas. El método de McGehee convirtió las ecuaciones de Newton, que en principio solo eran válidas para r mayor que cero, en un sistema de ecuaciones diferenciales que tienen sentido cuando $r = 0$.

Las ecuaciones de Newton no poseen puntos de equilibrio, lo que significa que no hay configuraciones estáticas de los tres cuerpos: tres estrellas que se atraen entre sí no pueden permanecer quietas en el espacio. Sin embargo, al extender las ecuaciones de Newton a la variedad de colisión, aparecen puntos de equilibrio. Hay exactamente 10, un par por cada una de las cinco configuraciones centrales de la esfera de formas. Uno de los elementos de cada par representa el resultado final de dejar caer la correspondiente configuración central hacia la colisión triple. Pero las ecuaciones de Newton no cambian si el tiempo corre hacia atrás, por lo que podemos hacer evolucionar cualquier solución a la inversa y obtener otra solución. Para una configuración central, eso nos reporta una solución que explota desde la colisión triple y alcanza su tamaño máximo en la situación de caída libre. El otro elemento del par representa el punto de partida de esta solución «explosiva».

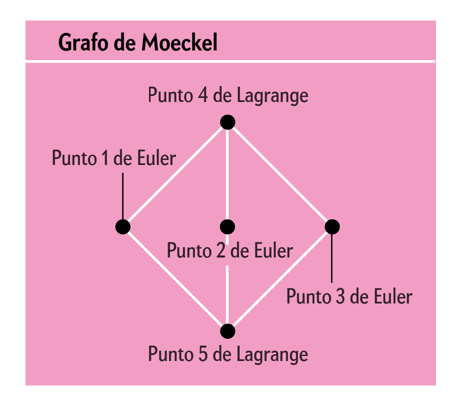
Estas dos soluciones para las configuraciones centrales (colisión y eyección) dan lugar a una solución única de colisión-eyección que abandona el punto de equilibrio de la eyección en $r = 0$, entra en la región con r mayor que cero, alcanza su tamaño máximo y luego vuelve a contraerse hasta terminar en el punto de equilibrio de la colisión, sobre la variedad de colisión triple. Esta solución completa

conecta los dos elementos de cada par de equilibrio.

Al hallar estos puntos de equilibrio asociados a las configuraciones centrales, McGehee le dio a Moeckel la oportunidad de aplicar algunos resultados recientes sobre sistemas dinámicos (que no estaban al alcance de Newton, Lagrange o Sundman) y lograr importantes avances en el problema de los tres cuerpos.

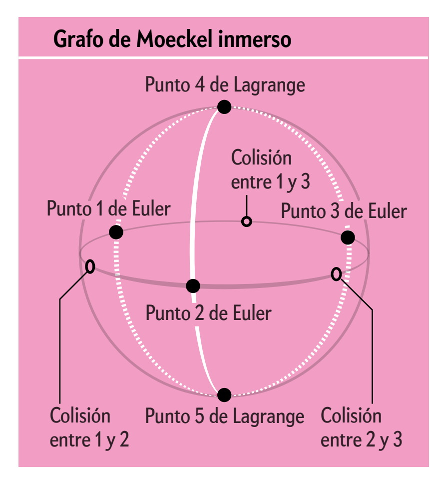
EL CAMINO DE MOECKEL

En los artículos de Moeckel vi el dibujo de un grafo con cinco vértices, etiquetados con los nombres de las configuraciones centrales y unidos por aristas.



Un «camino» en un grafo es un trayecto a través de sus vértices, en el que se recorren las aristas de vértice a vértice. Moeckel demostró el siguiente teorema: cualquier posible camino sobre su grafo corresponde a una solución al problema de los tres cuerpos; cuando el camino pasa por un determinado vértice, esta solución se aproxima durante algún tiempo a la de la configuración central que etiqueta el vértice. Por ejemplo, el trayecto E1 L4 E2 L5 corresponde a una solución que comienza muy parecida a la de eyección-colisión asociada al punto 1 de Euler, para luego precipitarse hacia la colisión triple siguiendo aproximadamente la solución de la configuración L4 de Lagrange; sin embargo, antes de alcanzar la colisión triple, los tres cuerpos salen disparados a lo largo de una de las cinco «vías», muy cerca de la solución de la configuración central E2. Finalmente, a medida que esta solución de Euler vuelve a colapsar hacia la colisión triple, la solución pasa a asemejarse a una forma equilátera L5 de Lagrange. Y lo que es más, si repetimos este mismo camino, haciéndolo periódico, la solución que lo sigue también será periódica.

Poco después de que Simó sugiriera que debía haber un mecanismo dinámico, me di cuenta de que era posible representar el grafo de Moeckel sobre la esfera de formas.



Lo importante de este grafo «inmerso» es que encierra toda la topología de la esfera con sus tres agujeros de colisión binaria. De hecho, podemos deformar la esfera perforada tres veces hasta transformarla en el grafo, y al hacerlo convertimos cualquier bucle de dicha esfera en un camino sobre el grafo. Para visualizar esta deformación, imaginemos la esfera como la superficie de un globo y realicemos tres pinchazos, uno en cada agujero de colisión binaria. El material del globo es muy elástico, de modo que podemos agrandar los tres pinchazos hasta conseguir que sus bordes casi se toquen, y entonces el material restante forma una estrecha tira que se ciñe al grafo inmerso. Este proceso deforma cualquier curva cerrada en la esfera con tres agujeros y la convierte en una curva cerrada sobre la tira y, a partir de ahí, en un camino sobre el grafo inmerso de Moeckel.

Para tornar esta imagen en un teorema sobre las soluciones, necesitaba demostrar que, si proyectamos sobre la esfera de formas las soluciones garantizadas por el teorema de Moeckel, estas nunca se alejan demasiado del grafo inmerso. Si lo hicieran, podrían serpentear alrededor de las colisiones binarias o incluso pasar por una de ellas, lo que eliminaría o añadiría bucles relevantes desde el punto de vista topológico y cambiaría la secuencia de eclipses. Le escribí un correo electrónico a Moeckel para pedirle ayuda. «¿De verdad me vas a obligar a releer artículos que escribí hace más de 20 años?», me contestó. Sin embargo, volvió a sumergirse en su antigua investigación y demostró que las proyecciones de las soluciones que había representado simbólicamente tantos años atrás nunca se alejaban demasiado del grafo inmerso. Mi pregunta ya tenía respuesta. O casi.

Durante los 17 años previos a mi conversación con Simó, me había centrado en soluciones con momento angular nulo. (En este contexto, el momento angular es una medida de la rotación total de un sistema y es constante para cada solución.) Esta insistencia se debía a que, de entre todas las curvas con una determinada secuencia de eclipses, las soluciones que minimizan la acción deben tener momento angular nulo. Pero la demostración de Moeckel precisaba un poco de momento angular para conseguir que las soluciones recorrieran las aristas del grafo. En matemáticas, el símbolo para una pequeña cantidad positiva es la letra griega épsilon. Así pues, necesitábamos un momento angular épsilon.

Aún había otra pega con los resultados de Moeckel: cuando sus soluciones cruzaban el ecuador de la esfera de formas cerca de los puntos de Euler E1, E2 y E3, oscilaban de un lado al otro del ecuador antes de continuar hacia el polo norte o sur, hasta alcanzar casi la colisión triple a lo largo de la correspondiente vía de Lagrange, L4 o L5. Para describir estas oscilaciones, tomemos un entero positivo N y digamos que una secuencia de eclipses tiene longitud N si, cada vez que aparece un número en la secuencia, lo hace al menos N veces seguidas. Por ejemplo, la secuencia 1112222333332222 tiene longitud 3, pero no 4, porque solo hay tres unos seguidos.

Y he aquí, finalmente, nuestro teorema principal: consideremos el problema de los tres cuerpos con un pequeño momento angular épsilon distinto de cero y masas dentro de un amplio intervalo abierto. Entonces existe un número entero positivo y grande N tal que, si elegimos cualquier secuencia de eclipses con longitud N, hay una solución al problema de los tres cuerpos que presenta exactamente esa secuencia de eclipses. Si la secuencia es periódica, también lo será la solución.

¿Qué hay de mi pregunta original? No mencionaba ningún N grande, sino que se refería a cualquier secuencia de eclipses. El caso es que esa no era mi verdadera pregunta: lo que realmente me interesaba saber era si podía generar cualquier «tipo topológico» de curva periódica, no cualquier secuencia de eclipses. He usado la secuencia de eclipses como una manera conveniente de representar el tipo topológico, es decir, de codificar la mane-

ra en que el bucle serpentea alrededor de los tres agujeros de colisión binaria. Sin embargo, esta representación presenta redundancias: hay muchas secuencias de eclipses que se corresponden con el mismo tipo topológico de curva. Consideremos, por ejemplo, el tipo topológico «da una vuelta alrededor del agujero que resulta de excluir la colisión binaria 23». La secuencia de eclipses 23 representa este tipo topológico. Pero también las secuencias 2223, 222223 y 2333. Siempre que tengamos dos cruces consecutivos del arco 2, podemos cancelarlos enderezando las sinuosidades y haciendo que esa parte de la curva permanezca en un hemisferio o en el otro, sin atravesar el ecuador.

Secuencias de eclipses y tipo topológico

1 (12) 2 (23) 3

1 (12) 2 (23) 3

1 2 3

En definitiva, podemos cancelar cualquier par de números iguales consecutivos en una secuencia de eclipses sin cambiar el tipo topológico de curva cerrada que representa dicha secuencia.

Aplicando este procedimiento, podemos conseguir que en la secuencia de eclipses que codifica un determinado tipo topológico nunca haya dos números iguales consecutivos: ni 11, ni 22, ni 33. Diremos que una secuencia así es «admisible». Ahora ya podemos usar nuestro teorema principal para responder a mi pregunta. Tomemos cualquier secuencia admisible, como 123232. Usaré notación exponencial para escribir las secuencias de eclipses, de modo que, por ejemplo, $1^3 = 111$. Elijamos un entero impar n al menos tan grande como el número N de nuestro teorema principal. Sustituyamos la secuencia admisible por la secuencia más larga $1^n\,2^n\,3^n\,2^n\,3^n\,2^n$ y hagamos que continúe periódicamente. La secuencia resultante representa el mismo tipo topológico que la secuencia original porque n es impar. Y nuestro teorema asegura que hay una solución periódica que produce esta secuencia más larga. Dicha solución periódica representa nuestro tipo topológico original 123232.

¿Y AHORA QUÉ?

Aún queda mucho por hacer. Cuando formulé mi pregunta hace casi 20 años, solo buscaba soluciones con momento angular nulo. Pero todo parece apuntar a que, en ese caso, la respuesta a mi pregunta es negativa. Por ejemplo, tenemos algunos indicios de que ninguna solución periódica al problema de los tres cuerpos con masas iguales y momento angular nulo da lugar a la secuencia periódica no vacía más simple, 23.

Tal y como la he planteado aquí, mi pregunta principal sigue abierta incluso para un momento angular épsilon, porque nuestro teorema solo nos permite producir secuencias de longitud N, para N grande. Por ejemplo, no sabemos cómo obtener secuencias admisibles, es decir, que no presenten números iguales consecutivos.

Puede que no estemos más cerca de «resolver» el problema de los tres cuerpos en el sentido tradicional, pero hemos aprendido muchas cosas. Y no cejaremos en nuestro empeño: este seguirá siendo un problema fructífero para aquellos que estamos atrapados por su encanto. Y es que aún pueden surgir nuevas ideas a partir de uno de los problemas clásicos de la historia de las matemáticas. IyC

PARA SABER MÁS

A remarkable periodic solution of the three-body problem in the case of equal masses. Alain Chenciner y Richard Montgomery en *Annals of Mathematics*, vol. 152, n.° 3, págs. 881-901, noviembre de 2000.

Realizing all reduced syzygy sequences in the planar three-body problem. Richard Moeckel y Richard Montgomery en *Nonlinearity*, vol. 28, n.° 6, págs. 1919-1935, junio de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ley y orden en el universo. Barbara Burke Hubbard y John Hubbard en *IyC*, marzo de 1995.

Los *Principia*: más allá de la pregunta de Halley. Niccolò Guicciardini en *Newton*, colección *Temas* de *IyC* n.° 50, 2007.



LAS IMÁGENES FIGURATIVAS descubiertas en una cueva de Indonesia datan de hace 43.900 años y son mucho más antiguas que otras manifestaciones artísticas similares halladas en Europa.

ARQUEOLOGÍA

La primera historia

Las pinturas rupestres de una cueva de Indonesia podrían constituir la manifestación de arte narrativo más antigua descubierta hasta la fecha

Kate Wong

Kate Wong es responsable de redacción de *Scientific American* sobre evolución y ecología.



En la sala 67 del Museo del Prado, Francisco de Goya cautiva a los visitantes con una escena abominable sobre el mito griego de Cronos (Saturno en la versión romana), que se comió a sus hijos por miedo a ser derrocado por ellos. Los críticos han interpretado el cuadro de Goya —que muestra al dios caníbal con los ojos muy abiertos y una expresión de horror, vergüenza y locura mientras devora a su hijo— como una alegoría de los estragos de la guerra, la decadencia de la sociedad española o el declive psicológico del artista. Es una de las mejores obras de arte narrativas de todos los tiempos. Por supuesto, muy pocas personas alcanzan semejante dominio de la narración visual, pero, incluso en sus formas más sencillas, esta expresión creativa es una característica singular de nuestra especie: solo *Homo sapiens* es capaz de inventar historias y transmitirlas a través de imágenes.

Los arqueólogos han buscado con insistencia los orígenes de nuestro distintivo comportamiento artístico. Durante mucho tiempo, los ejemplos más antiguos de arte figurativo (en contraposición a los trazos abstractos) y de representaciones de criaturas ficticias se hallaron en yacimientos europeos de hace menos de 40.000 años. Sin embargo, recientemente los investigadores han descubierto obras figurativas anteriores en el sudeste asiático, y acaban de hallar la más antigua conocida hasta la fecha en la isla de Sulawesi, en Indonesia. En un artículo publicado el pasado diciembre en *Nature*, un equipo encabezado por Maxime Aubert, Adhi Agus Oktaviana y Adam Brumm (todos ellos de la Universidad Griffith, en Australia) señala que esta pintura rupestre parece mostrar diversas figuras humanas de aspecto fantástico cazando animales reales. Si están en lo cierto, el hallazgo también podría constituir el primer registro pictórico de una narración y de pensamiento sobrenatural.

UNA ESCENA DEL PASADO

El equipo descubrió la pintura en 2017, en una cueva conocida como Leang Bulu' Sipong 4, que se encuentra en la región kárstica de Maros-Pangkep (al sur de Sulawesi), en mitad de un paisaje sobrecogedor con imponentes acantilados y torres de piedra caliza. En la irregular pared de la caverna, seis pequeños cazadores se enfrentan a un enorme búfalo, blandiendo cuerdas o lanzas. Cerca, otros cazadores arremeten contra más búfalos y jabalíes. Los cazadores parecen humanos, pero exhiben misteriosos rasgos animales: uno posee una cola y otro un pico, por ejemplo. Tales figuras híbridas entre hombres y animales se denominan teriántropos (término formado a partir de las palabras griegas para «bestia» y «hombre») y se consideran indicativas de pensamiento espiritual. Algunos ejemplos célebres son el minotauro con cabeza de toro de la mitología griega y el dios egipcio Anubis, que tiene cabeza de chacal. Los investiga-

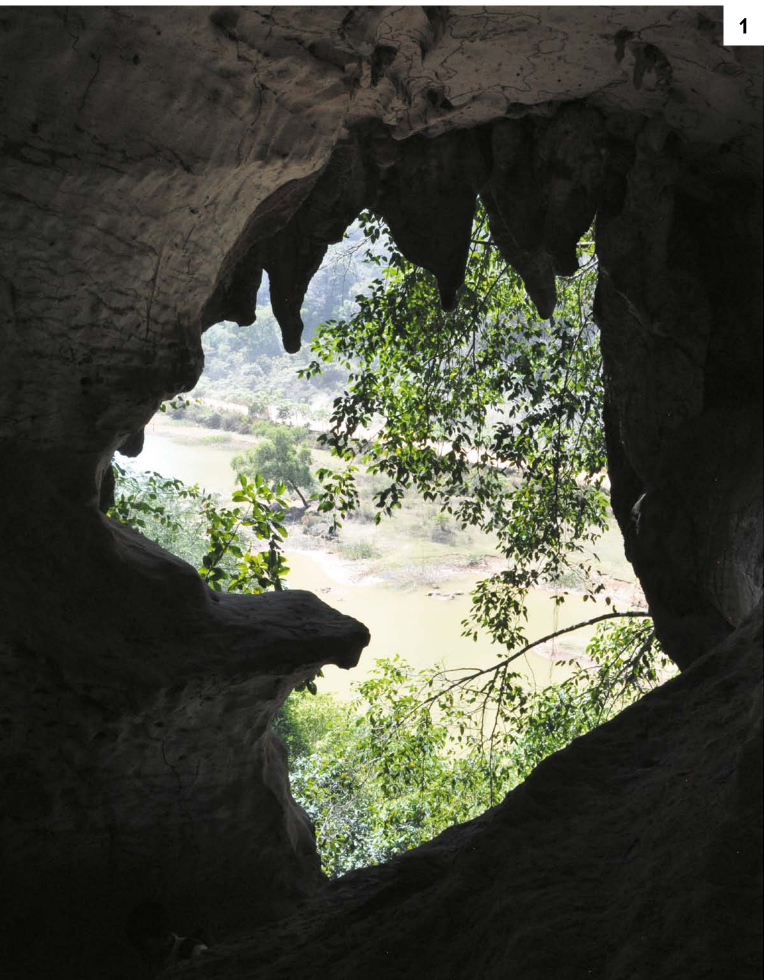
EN SÍNTESIS

Homo sapiens es la única especie conocida capaz de producir arte figurativo, tener pensamiento espiritual y transmitir historias ficticias a través de imágenes.

Durante años, las pruebas más antiguas de tal expresión creativa se hallaron en Europa, continente que se consideraba una «escuela de refinamiento» para nuestra especie.

Una pintura rupestre de Indonesia que parece mostrar una escena de caza con elementos sobrenaturales sería más antigua que todas las obras similares descubiertas en Europa.

PÁGINAS ANTERIORES: ADHI AGUS OKTAVIANA





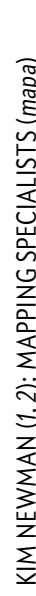
dores sugieren que las diversas figuras, todas pintadas con un pigmento rojizo, forman parte de la misma escena y podrían estar mostrando una batida, una estrategia de caza comunal donde se acosa a las presas para que abandonen su refugio y se dirijan hacia los cazadores.

Para datar las imágenes, los arqueólogos midieron la desintegración radiactiva del uranio contenido en los depósitos de mineral que se habían formado sobre ellas. Analizando muestras de diferentes partes de la escena, el equipo obtuvo antigüedades mínimas de entre 43.900 y 35.100 años. Si la pintura tuviera al menos 43.900 años, como defienden Aubert y sus colaboradores, se convertiría en la obra de arte figurativa más antigua conocida, un récord que ahora ostenta una pintura de un bóvido de hace 40.000 años hallada en una cueva de Borneo. También superaría la antigüedad del que se considera el primer teriántropo —el *Löwenmensch* u «hombre león», una estatuilla de hace entre 39.000 y 40.000 años procedente de Alemania— y la de una escena de caza de hace 17.000 años dibujada en la famosa cueva de Lascaux, en Francia [*véase* «Arqueología de la Cueva de Lascaux», por Arlette Leroi-Gourhan. Investigación y Ciencia, agosto de 1982].

Leang Bulu' Sipong 4

INDONESIA

LOS ARQUEÓLOGOS descubrieron la pintura rupestre en un yacimiento denominado Leang Bulu' Sipong 4, en la isla indonesia de Sulawesi (*1*). La entrada a la cueva está muy por encima del suelo y es de difícil acceso (*2*).



La localización geográfica de la pintura también resulta reveladora. Aunque los expertos coinciden en que los humanos se originaron en África, «se pensaba que Europa era una especie de "escuela de refinamiento" para la humanidad», explica la arqueóloga April Nowell, de la Universidad de Victoria, ya que los ejemplos más antiguos de arte y de otros comportamientos complejos siempre se habían encontrado en el Viejo Continente. Pero, en realidad, eso solo reflejaba la enorme cantidad de investigaciones arqueológicas realizadas en Europa, especialmente en Francia. Según Nowell, «este nuevo hallazgo se suma a un abundante, antiguo y variado registro de arte rupestre de Indonesia y Australia, y subraya la importancia de llevar a cabo investigaciones fuera de Europa».

Otro aspecto interesante de la pintura recién descubierta es su posición, en una cueva cuya entrada está a unos 7 metros del suelo y a la que resulta complicado acceder sin una escalera o equipo de escalada. En Europa, las pinturas rupestres más antiguas a menudo se encuentran en pasajes profundos

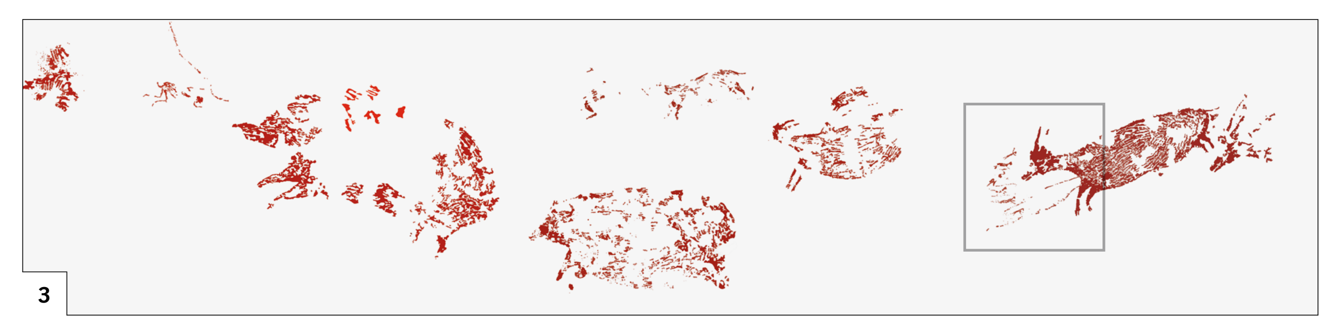
EN UNA SECCIÓN de la pintura rupestre, unas figuras que se han interpretado como teriántropos (seres míticos en parte humanos y en parte animales) parecen estar cazando un búfalo endémico de la región (*1*). Aunque parte de las imágenes están erosionadas, una panorámica que combina múltiples fotografías tratadas (*2*) y un calco digital del panel (*3*) revelan más figuras teriantrópicas, junto a otros búfalos y jabalíes. Algunas muestras de los depósitos de mineral que se formaron encima de las figuras se dataron por el método de las series de uranio, que mide la desintegración radioactiva de este elemento. Dicho análisis indicó antigüedades mínimas de entre 43.900 y 35.100 años.



1



2



3

RATNO SARDI (1); ADHI AGUS OKTAVIANA, RATNO SARDI Y ADAM BRUMM (2, 3)

y oscuros, donde no debía ser fácil ni entrar ni pintar, lo cual hace pensar que esos lugares podían encerrar un significado especial para los artistas. Brumm apunta que, en Sulawesi, las imágenes primitivas casi siempre se encuentran cerca de las entradas de cavernas y refugios rocosos, es decir, en zonas con luz natural. Pero, al igual que la pintura de Leang Bulu' Sipong 4, se sitúan en cuevas y nichos altos y difíciles de alcanzar, diseminados por los riscos y torres de piedra caliza de la región. Según Brumm, «más allá del arte, estos yacimientos no muestran ningún indicio de haber sido habitados, y suponemos que nuestros ancestros solo los usaron para dejar sus imágenes. El porqué no lo sabemos. Pero quizá crear arte rupestre en sitios tan inaccesibles, muy por encima del suelo, tenía algún tipo de significado cultural y simbólico más profundo». El investigador añade que, para llegar a estos emplazamientos, los artistas seguramente tenían que trepar por enredaderas, emplear varas de bambú o abrirse camino a través de la red de cavidades interiores de las torres kársticas. No obstante, aunque puede que los antiguos pintores de Sulawesi y sus homólogos europeos plasmaran sus creaciones en lugares imbuidos de significado y recurrieran a algunas convenciones estilísticas similares, «no es probable que exista una conexión histórica o cultural directa entre las representaciones de animales realizadas en el Pleistoceno en Indonesia y Europa», concluye Brumm.

> «Un rasgo muy interesante del ser humano es nuestra gran memoria de trabajo, que nos permite hacer planes, secuenciar eventos mentalmente antes de realizarlos y, por supuesto, contar historias»
>
> *—April Nowell, Universidad de Victoria*

De hecho, aunque la pintura recién descubierta podría retrasar la fecha de las primeras escenas figurativas, teriantrópicas y narrativas, nos revela muy poco sobre el impulso que dio origen a estas expresiones creativas. Durante decenios, los investigadores se han preguntado por el aparente desfase entre la aparición de la anatomía humana moderna y el inicio de comportamientos humanos modernos como la creación artística. Mientras que la anatomía evolucionó hace cientos de miles de años, los elementos de la conducta moderna surgieron bastante más tarde, a tenor de la cultura material conservada en el registro arqueológico. Algunos científicos han propuesto que un cambio más reciente en las capacidades cognitivas podría haber reforzado el ingenio de nuestros antepasados. Otros suponen que se dieron factores culturales, sociales o ambientales que avivaron su creatividad. «La pintura rupestre que hemos datado no aporta información directa sobre esta interesante pregunta», lamenta Brumm. Pero, en vista de las pruebas disponibles, sospecha que las narraciones ficticias surgieron mucho antes que esa pintura, «tal vez incluso antes de que nuestra especie se extendiese fuera de África».

La imagen también puede arrojar luz sobre otros aspectos de la mente de nuestros predecesores. «Uno de los rasgos más interesantes del ser humano es nuestra gran memoria de trabajo», explica Nowell, «que nos permite hacer planes, secuenciar eventos mentalmente antes de realizarlos y, por supuesto, contar historias». Nowell señala que la antropóloga Polly Wiessner, de la Universidad de Utah, ha mostrado que en muchos grupos actuales de cazadores-recolectores la gente habla de cosas distintas en función del momento del día. Durante las horas de sol, suelen cotillear o tratar asuntos económicos o políticos. Por la noche, en cambio, cuentan historias y cantan canciones.

«Las historias y las canciones son lo que nos une», observa Nowell. «Este panel sugiere que la tradición de contar historias surgió hace [decenas de] miles de años. Esos relatos pueden versar sobre hechos reales o mitológicos, pueden instruir y entretener al mismo tiempo.» Aunque seguramente nunca sepamos qué representa exactamente la pintura de Sulawesi, Nowell afirma que «a medida que vamos recopilando estas historias, estas escenas, comenzamos a entender lo que era importante para las personas de un determinado momento y lugar».

PREGUNTAS PENDIENTES

En cuanto a quién pintó las figuras de Leang Bulu' Sipong 4, no se ha encontrado ningún resto humano de ese periodo en esa cueva ni en ningún otro yacimiento de Sulawesi. Sabemos que hubo otras especies humanas aparte de *H. sapiens* (incluidos los neandertales) que produjeron arte, aunque parece haber sido exclusivamente abstracto. También tenemos constancia de que otras especies humanas habitaron el sudeste asiático en un pasado no muy lejano: *Homo floresiensis* vivió en la isla indonesia de Flores hace 60.000 años, *Homo luzonensis* habitó en Filipinas hace 50.000 años, y un estudio genético ha concluido que un grupo tardío de denisovanos pudo haberse cruzado con *H. sapiens* en Indonesia o Nueva Guinea hace tan solo 15.000 años [*véase* «El último hominino», por Kate Wong. Investigación y Ciencia, noviembre de 2018]. A la pregunta de si alguna de estas otras especies pudo haber pintado la escena de caza, Brumm responde que «dada la complejidad de las imágenes, nuestra hipótesis de trabajo es que las crearon humanos modernos, gente que esencialmente tenía la misma arquitectura cognitiva que nosotros. Pensamos que estos pobladores se establecieron en Sulawesi durante la primera ola migratoria de *Homo sapiens* a Indonesia, hace al menos entre 70.000 y 50.000 años».

Pero esa complejidad también ha generado cierto debate. De acuerdo con el arqueólogo Paul Pettitt, experto en arte prehistórico de la Universidad de Durham que no participó en el nuevo estudio, aunque uno de los animales del grupo tiene al menos 43.900 años, la mayoría de las otras figuras no han sido datadas. «No es muy habitual encontrar escenas en el arte del Pleistoceno», observa. «Si la pintura estuviera en Europa, África o Norteamérica, no tendría más de 10.000 años de antigüedad.» Pettitt señala que el tamaño de los supuestos teriántropos es muy diferente al de los animales que parecen estar cazando. «¿Podría ser que no estuvieran relacionados con los animales?», se pregunta. ¿O puede incluso que los pintaran mucho más tarde? «Sabemos que, en Europa, las cuevas con pinturas rupestres fueron decoradas en varias fases separadas por miles de años», comenta. El análisis geoquímico de los pigmentos empleados podría confirmar si las distintas figuras de Leang Bulu' Sipong 4 son de la misma época.

Pettitt tampoco está convencido de que los cazadores sean teriántropos, ni tan solo de que sean humanos. «Algunas figuras son vagas y plantean muchas dudas», recela. «Hasta los ejemplos más claros podrían ser cuadrúpedos», añade, subrayando que dichas figuras aparecen en horizontal. Y las supuestas lanzas solo son «líneas largas que pasan cerca de algunos "humanos", más que armas en sus manos», prosigue. «Así que es discutible que las figuras sean humanas y, si se trata de una escena, que esta sea de caza.»

Los futuros estudios podrían resolver estas dudas. El equipo que realizó el hallazgo ha descubierto en la misma región muchos otros yacimientos con pinturas figurativas que aún no han sido datadas. Tal vez proporcionen nuevas pistas sobre los orígenes de la mente humana moderna, con su capacidad de crear imágenes, narrar historias e inventar mitos.

PARA SABER MÁS

Earliest hunting scene in prehistoric art. Maxime Aubert et al. en *Nature*, vol. 576, págs. 442-445, diciembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La aparición de la mente moderna. Kate Wong en *IyC*, agosto de 2005.
Cultura y evolución humana. VV.AA. Colección *Temas* de *IyC* n.º 87, 2017.

CIENCIAS DE LA TIERRA

Tornados de fuego

LOS INVESTIGADORES ESTÁN MÁS CERCA DE PODER PREDECIR CUÁNDO Y DÓNDE APARECERÁN ESTOS VÓRTICES LETALES

Jason M. Forthofer

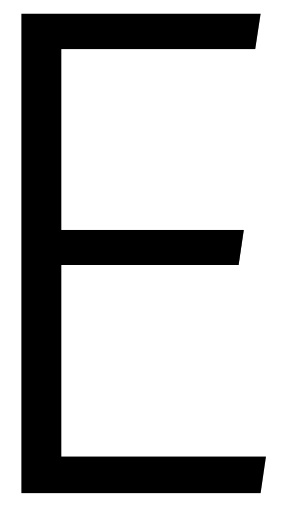
Fotografías de Spencer Lowell



LA ROTACIÓN DEL AIRE que sopla sobre un recipiente de alcohol en llamas genera un remolino de fuego en el Laboratorio de Ciencias del Fuego de Missoula, en Montana.

Jason M. Forthofer es bombero e ingeniero mecánico del Servicio Forestal de EE.UU. en el Laboratorio de Ciencias del Fuego de Missoula, Montana. Investiga la transferencia de calor y la dinámica de fluidos en los incendios forestales mediante estudios de campo, de laboratorio y computacionales.





L AVIÓN COMENZÓ A DESCENDER Y NOS SUMERGIMOS EN LA NUBE DE HUMO QUE cubría el suroeste de Oregón y el norte de California. Era finales de julio de 2018 y la región sufría una oleada de grandes incendios, y yo me disponía a unirme a un equipo del Departamento de Silvicultura y Protección contra Incendios de California que investigaba un incidente mortal acaecido dos días antes. Lo que me había contado por teléfono el director del equipo me produjo escalofríos: «Un bombero ha perdido la vida en un tornado de fuego que arrastró su vehículo decenas de metros».

Yo sabía, quizá mejor que nadie, que algo así podía acabar sucediendo. Diez años atrás había presenciado por primera vez las secuelas de un tornado de fuego. El torbellino, de casi 300 metros de diámetro, se había separado del llamado incendio Indians, en California, y había arremetido contra un grupo de bomberos. Según uno de los supervivientes, el viento soplaba con tanta fuerza que tratar de ponerse a salvo era como correr sumergido en agua hasta el pecho. Por suerte, los hombres se hallaban en una carretera asfaltada de dos carriles, lo que probablemente les salvó la vida: si hubieran estado a tan solo tres metros, rodeados de árboles y hierba, habrían perecido. Cuando llegué al lugar, todo estaba cubierto de enormes ramas de roble y en el suelo no quedaba ni un guijarro.

La escena me dejó preocupado. Estaba claro que un tornado de fuego podía herir a bomberos refugiados en áreas que normalmente se consideran seguras. Se habían librado por muy poco. Muchos de nosotros ya habíamos visto remolinos de fuego (columnas ardientes giratorias del tamaño de un torbellino) y no los considerábamos especialmente peligrosos. En cambio, los tornados de fuego, que combinan el poder destructivo del fuego con el de vientos tan fuertes como los de un verdadero tornado, eran tan poco frecuentes que casi parecían míticos. Yo mismo conocía solo un caso de oídas, a pesar de que era bombero desde 1996 y llevaba ocho años investigando el comportamiento del fuego.

Al regresar a mi lugar de trabajo habitual (el Laboratorio de Ciencias del Fuego de Missoula, en Montana), realicé una investigación bibliográfica y encontré algunos informes, la mayoría bastante vagos, sobre tornados de fuego producidos alrededor del mundo en el pasado reciente o remoto. Los datos eran tan escasos que los científicos ni siquiera coincidían en la definición del fenómeno. Los grandes incendios forestales pueden generar pirocumulonimbos: nubes tormentosas cubiertas de hielo que se condensan a gran altura a partir de la humedad liberada en el incendio, la cual procede de la vegetación quemada, del vapor de agua presente en la atmósfera y de la propia combustión. Algunos investigadores sostienen que solo pueden considerarse tornados de fuego los vórtices que están conectados a pirocumulonimbos. De acuerdo con este criterio, habría un único caso documentado, ocurrido durante una tormenta de fuego que azotó Canberra en 2003. El tornado causó estragos a lo largo de más de veinte kilómetros.

Sin embargo, esta descripción parecía demasiado restrictiva para ayudar a los bomberos. Definiendo los tornados de fuego como remolinos ardientes cuyos vientos alcanzan las velocidades de un tornado normal, mi colaborador Bret Butler y yo recopilamos toda la documentación que fuimos capaces de encontrar y preparamos manuales y cursos para los bomberos. Pero ahora me veía dirigiéndome hacia el incendio Carr, en las afueras de Redding (al norte de California), para investigar lo que llevaba tanto tiempo intentado prevenir: la muerte de un bombero a causa de un tornado de fuego.

EL TORNADO DEL INCENDIO CARR

El lugar parecía un campo de batalla. El famoso especialista en tornados Josh Wurman, a quien había reclutado para la investigación, tampoco había visto nunca nada parecido. Había manzanas de viviendas completamente arrasadas donde solo quedaban los cimientos. La zona estaba cubierta de tejados y otros escombros, y algunos vehículos habían dado varias vuel-

EN SÍNTESIS

Los tornados de fuego, vórtices ardientes cuyos vientos alcanzan las velocidades de un tornado normal, son muy poco frecuentes pero extremadamente destructivos.

Para que se forme un tornado de fuego hace falta una fuente de rotación en la atmósfera. El fuego puede concentrar esa vorticidad en una columna giratoria de aire.

Aunque los científicos comprenden bastante bien la física de los tornados de fuego, aún no pueden predecir cuándo y dónde aparecerán.



UNOS TABLONES ARDIENDO en una disposición triangular permiten que el aire se arremoline en la zona central, donde otro fuego concentra la rotación en un vórtice. Los incendios forestales o urbanos pueden generar tornados de fuego de un modo similar, siempre que tengan la forma adecuada.

tas de campana. Los árboles aparecían partidos o arrancados de cuajo, y las partículas de arena y roca arrastradas por el viento los habían despojado de su corteza. Tres torres eléctricas de metal de unos 30 metros de altura se habían derrumbado, y una de ellas había recorrido 300 metros por los aires. Un contenedor de mercancías de 12 metros estaba destrozado, y una tubería de acero se enroscaba alrededor de los postes de electricidad abatidos.

Calculamos que los vientos podían haber alcanzado los 265 kilómetros por hora, una velocidad propia de los tornados de clase 3 en la escala de Fujita mejorada (que va de 0 a 5, donde el 5 corresponde a los vientos más rápidos y destructivos). En toda la historia de California solo se habían registrado dos tornados corrientes de tal intensidad. La combustión de los gases pudo producir temperaturas máximas de unos 1500 grados Celsius en el interior del vórtice de fuego, que medía más de 300 metros de diámetro en su base y alcanzó casi cinco kilómetros de altura, según las imágenes de radar. El objeto perduró al menos 40 minutos y fue desplazándose lentamente, dejando una estela de destrucción de un kilómetro y medio.

Entrevistamos a testigos y grabamos imágenes, con la esperanza de aprender de lo sucedido. El tornado de fuego se desató la noche del 26 de julio de 2018, en el transcurso de un incendio forestal que arrasó casi cien mil hectáreas al noroeste de Redding y que alcanzó tal tamaño e intensidad como para generar pirocumulonimbos a más de cinco kilómetros de altura. De pronto, sobre las 17:30, las llamas se extendieron rápidamente hacia el este y acabaron con la vida de Don Smith, operador de excavadoras del cuerpo de bomberos, y de otra persona que estaba en su casa. Al aproximarse a las afueras de Redding, el incendio produjo una serie de remolinos de fuego y arrojó rescoldos a más de un kilómetro y medio de distancia, hasta la otra orilla del río Sacramento. Esas brasas iniciaron varios incendios pequeños y aislados cerca de dos áreas residenciales situadas al final de una carretera sin salida. A partir de ahí la situación se volvió caótica, con los bomberos tratando de evacuar a los ciudadanos y proteger sus casas, aun cuando se estaban quedando sin vías de escape. Era literalmente un sálvese quien pueda.

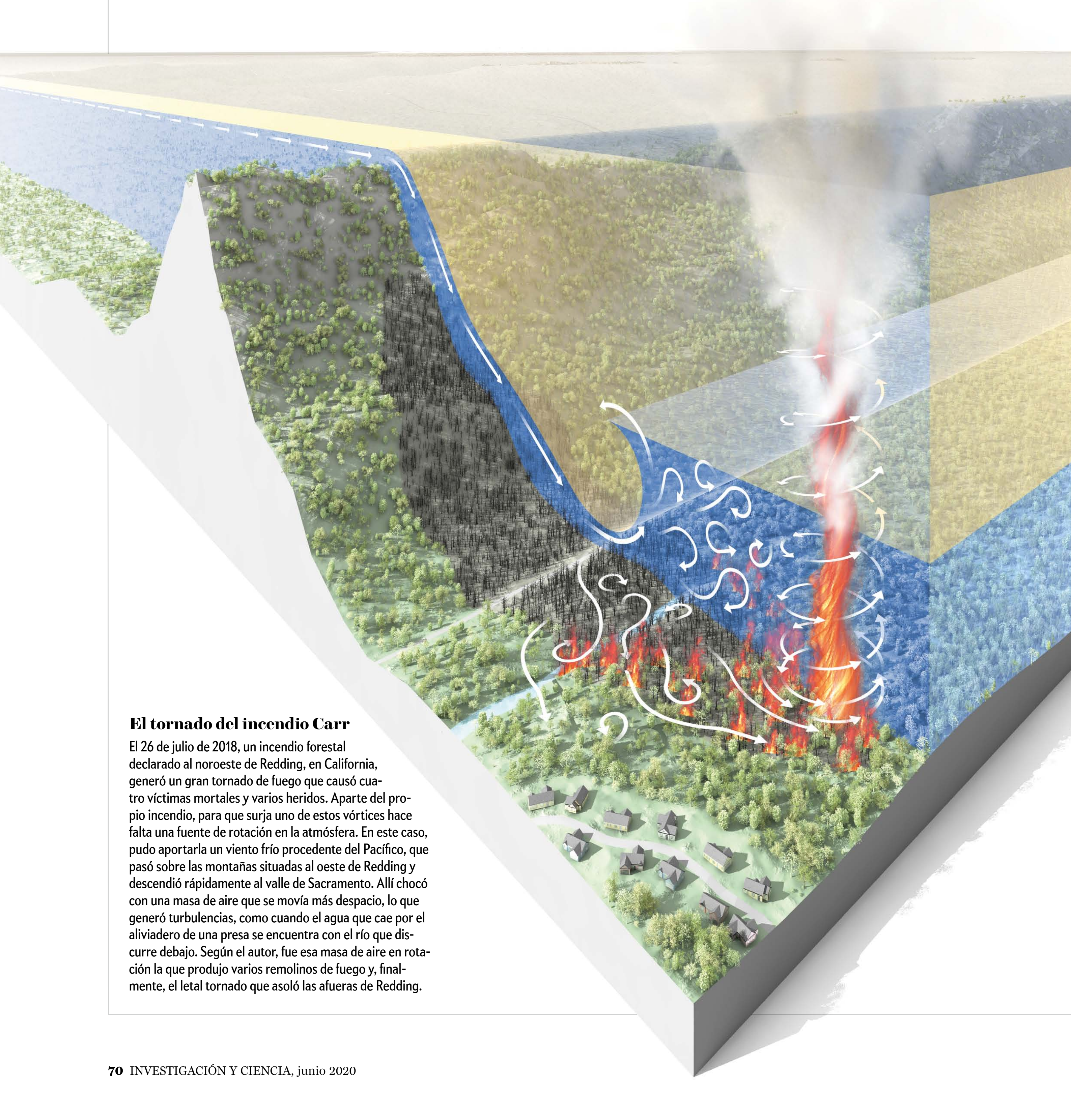
Jeremy Stoke, bombero de Redding, acudió a la zona para ayudar. Pero cuando ya estaba llegando, a eso de las 19:30, se formó sobre la carretera un tornado de fuego que dejó atrapados a bomberos y habitantes en las áreas residenciales. Parece que el tornado sorprendió a Stoke mientras conducía. Aún tuvo tiempo de usar la radio para realizar una llamada de socorro antes de que los fuertes vientos arrollaran su vehículo, que dio varias vueltas de campana y acabó estrellándose contra un árbol, a decenas de metros de distancia. Horas después hallaron el cuerpo sin vida de Stoke, que falleció a causa de los graves traumatismos.

El tornado bombardeó con escombros dos vehículos del Departamento de Silvicultura y Protección contra Incendios

Continúa en la página 72

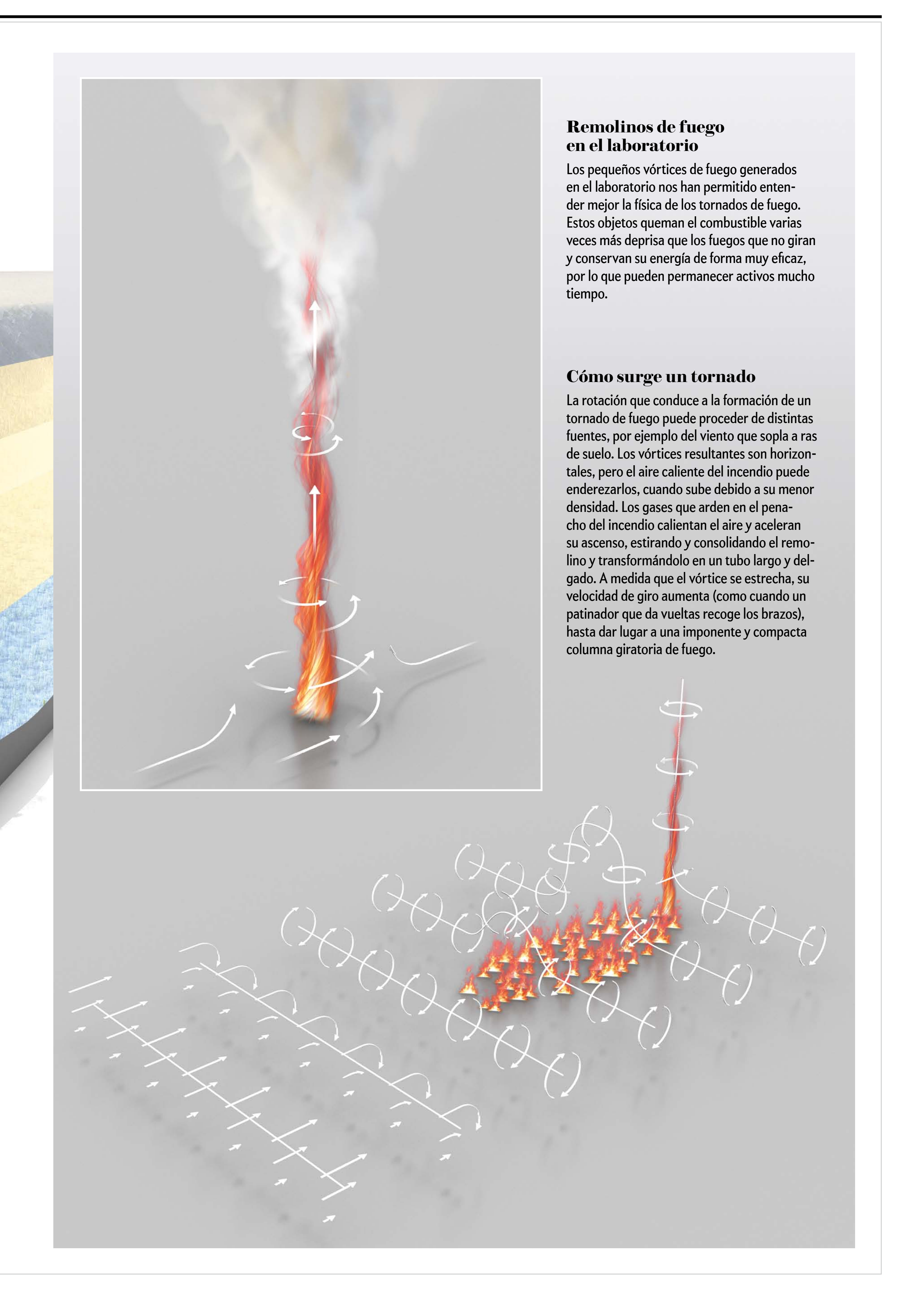
Tornados en incendios forestales

Los tornados de fuego, columnas de fuego y humo que rotan a velocidades comparables a las de un verdadero tornado, son poco frecuentes pero muy destructivos. Estos objetos letales son muy duraderos y pueden separarse del foco principal de un incendio y sorprender a bomberos y residentes. Pueden aspirar troncos en llamas y otros escombros y arrojarlos a grandes distancias, dando lugar a nuevos incendios imprevisibles. Pese a que los investigadores comprenden bastante bien la física de los tornados de fuego, predecir cuándo y dónde aparecerán sigue suponiendo un reto.



El tornado del incendio Carr

El 26 de julio de 2018, un incendio forestal declarado al noroeste de Redding, en California, generó un gran tornado de fuego que causó cuatro víctimas mortales y varios heridos. Aparte del propio incendio, para que surja uno de estos vórtices hace falta una fuente de rotación en la atmósfera. En este caso, pudo aportarla un viento frío procedente del Pacífico, que pasó sobre las montañas situadas al oeste de Redding y descendió rápidamente al valle de Sacramento. Allí chocó con una masa de aire que se movía más despacio, lo que generó turbulencias, como cuando el agua que cae por el aliviadero de una presa se encuentra con el río que discurre debajo. Según el autor, fue esa masa de aire en rotación la que produjo varios remolinos de fuego y, finalmente, el letal tornado que asoló las afueras de Redding.


Remolinos de fuego en el laboratorio
Los pequeños vórtices de fuego generados en el laboratorio nos han permitido entender mejor la física de los tornados de fuego. Estos objetos queman el combustible varias veces más deprisa que los fuegos que no giran y conservan su energía de forma muy eficaz, por lo que pueden permanecer activos mucho tiempo.
Cómo surge un tornado
La rotación que conduce a la formación de un tornado de fuego puede proceder de distintas fuentes, por ejemplo del viento que sopla a ras de suelo. Los vórtices resultantes son horizontales, pero el aire caliente del incendio puede enderezarlos, cuando sube debido a su menor densidad. Los gases que arden en el penacho del incendio calientan el aire y aceleran su ascenso, estirando y consolidando el remolino y transformándolo en un tubo largo y delgado. A medida que el vórtice se estrecha, su velocidad de giro aumenta (como cuando un patinador que da vueltas recoge los brazos), hasta dar lugar a una imponente y compacta columna giratoria de fuego.
BRYAN CHRISTIE DESIGN

Viene de la página 69
de California que circulaban por la carretera, rompiendo la mayoría de sus cristales. Curiosamente, uno de los camiones sufrió casi todos los daños en el lado del conductor, y el otro, en el del copiloto (a pesar de que se encontraban a tan solo 45 metros y avanzando en la misma dirección), lo que delata el movimiento giratorio del aire. Los ocupantes tuvieron que acurrucarse entre los asientos para ponerse a salvo de los proyectiles. También estallaron las ventanas de tres excavadoras cercanas y los cristales le causaron heridas en el ojo a uno de los operarios, mientras que otro sufrió quemaduras graves en las manos. Un policía retirado que trataba de escapar del incendio detuvo su vehículo al darse cuenta de que estaba envuelto en llamas; logró sobrevivir, pero sufrió quemaduras en las vías respiratorias. Y en los márgenes de aquel infierno giratorio tuvo lugar el suceso más luctuoso: dos niños y su bisabuela murieron al incendiarse su hogar.


EN NOVIEMBRE DE 2008, el incendio Corona, en el suroeste de California, generó un vórtice ardiente (posiblemente un tornado de fuego) que amenazó las viviendas de la zona.

DAVID MACNEW, GETTY IMAGES

EN EL LABORATORIO

¿Qué podemos aprender de un suceso como este? ¿Podemos predecir cuándo y dónde surgirá un tornado de fuego, para poder evacuar a residentes y bomberos? ¿Cuáles son las causas de este fenómeno?

El primer paso para responder a estas preguntas es volver la vista atrás. En 1871, una población de Wisconsin quedó devastada por lo que probablemente fue un tornado de fuego, a juzgar por la enorme cantidad de escombros arrojados (incluida una casa entera). En 1964, el incendio Polo, en California, generó un tornado de fuego que dejó cuatro heridos y destruyó dos casas, un granero, tres coches y un huerto de aguacates. Uno de los ejemplos más devastadores se produjo en la Segunda Guerra Mundial, durante el bombardeo incendiario de Hamburgo. La tormenta de fuego resultante engendró un tornado que, según el geógrafo Charles Ebert, llegó a alcanzar 3 kilómetros de diámetro y 5 de altura. Más de 40.000 civiles murieron en la conflagración.

En 1923, un gran terremoto provocó un incendio urbano en Tokio. Mientras las llamas se propagaban de un edificio a otro, los residentes se congregaron en una zona despejada entre las estructuras, donde se formó un gran tornado de fuego que acabó con la vida de unas 38.000 personas en 15 minutos. Durante más de medio siglo, la explicación aceptada de aquel trágico suceso fue que se había producido un tornado justamente en el mismo momento y lugar que el incendio. Pero en los años ochenta y noventa, los ingenieros S. Soma y K. Saito, de la Universidad de Kentucky, emplearon los registros históricos para construir un modelo a pequeña escala del incendio, que reproducía fielmente su geometría y los vientos ambientales. Su fuego experimental generó un vórtice, lo que demostraba que el tornado original no había aparecido por casualidad, sino como resultado del propio incendio.

Este trabajo se basó en los experimentos pioneros realizados dos décadas antes por George Byram y Robert Martin, de la Estación de Investigación Sur del Servicio Forestal de EE.UU., quienes habían creado pequeños remolinos de fuego en su laboratorio de Georgia. Su dispositivo consistía en un pequeño recipiente circular de alcohol en llamas rodeado por paredes cilíndricas, en las que unas rendijas verticales hacían que el aire entrase rotando al incendio. Tras formarse el remolino de fuego, el combustible se quemaba —y liberaba su energía— hasta tres veces más rápido que en un fuego estático. Aparentemente, la rotación del viento aceleraba la combustión al empujar las llamas contra la superficie del alcohol y calentarlo. Los estudios posteriores han hallado que en ese tipo de fuegos la energía llega a liberarse hasta siete veces más deprisa.

Algo parecido ocurre en los remolinos y tornados de fuego de los incendios forestales. Al calentarse, la madera libera cientos de gases inflamables, cuya combustión produce llamas. Los fuertes vientos horizontales que rotan en un tornado de fuego pueden lanzar esas llamas contra la vegetación subyacente e intensificar su combustión.

En 1967, Howard Emmons y Shuh-Jing Ying, de la Universidad Harvard, realizaron un experimento en el que rodearon un fuego estacionario con una pantalla cilíndrica de alambre que podía girar a distintas velocidades e inducir la rotación del aire que se incorporaba al fuego. Los investigadores midieron la velocidad del viento y la distribución de temperaturas en el remolino de fuego resultante, lo que les permitió vislumbrar su funcionamiento interno. Descubrieron que la formación de tales vórtices requiere, además del propio fuego, una fuente de rotación y un mecanismo que la intensifique.

Los tornados de fuego muestran básicamente el mismo comportamiento hidrodinámico. La atmósfera a menudo presenta una gran vorticidad, producida por el viento que se arremolina alrededor de las montañas o que sopla a ras de suelo, o por variaciones de densidad y presión. El fuego ejerce otros dos efectos fundamentales: concentra la rotación en una estructura cilíndrica y la endereza, con lo que acaba constituyéndose una estrecha columna de aire que gira en torno a un eje vertical.

En primer lugar, cuando el aire caliente asciende por encima de las llamas, el aire en rotación de los alrededores se ve atraído a la base del fuego para reemplazarlo. Aunque inicialmente parte de la vorticidad puede girar en torno a un eje horizontal, una vez que el aire es succionado al interior del penacho del incendio, su flujo ascendente endereza el eje hasta orientarlo en vertical.

Por otro lado, aunque el aire comienza a ascender despacio cuando está cerca del suelo, continúa calentándose a medida que se queman los gases que contiene. La presión alrededor del vórtice acelera el aire caliente y ligero que asciende en su interior, y eso hace que el remolino de fuego se estire verticalmente. En consecuencia, su diámetro disminuye (igual que

cuando intentamos separar un trozo de masa de pan y se forma un cuello largo y delgado) y su velocidad de giro aumenta para conservar el momento angular, como le ocurre a un patinador que gira sobre sí mismo al pegar los brazos al cuerpo.

Aparentemente, cuando un torbellino o tornado de fuego se desplaza sobre una zona en llamas, se estira hasta alcanzar una altura considerable, estrechándose y girando muy deprisa. Por el contrario, al atravesar un área ya quemada, se ensancha y desacelera hasta convertirse en un cilindro difuso de humo. De hecho, a veces se vuelve tan ancho y lento que los bomberos ni siquiera lo perciben. Aún tenemos que dilucidar cómo influyen los vientos ambientales y las características del terreno en la trayectoria que sigue el vórtice.

Emmons y Ying también comprobaron que los vórtices de fuego conservan su energía rotacional de manera muy eficaz, lo que (por desgracia) hace que duren bastante. Por ejemplo, el tornado de fuego del incendio Indians permaneció activo casi una hora. El aire que da vueltas está sometido a dos fuerzas radiales opuestas: la fuerza centrífuga tira del aire hacia fuera, mientras que la baja presión en el centro del vórtice lo atrae al interior. El equilibrio resultante limita el movimiento del aire en la dirección radial y, en consecuencia, las pérdidas de energía del tornado: los fuegos que no giran intercambian unas diez veces más energía con la atmósfera circundante. Este mecanismo también hace que los remolinos de fuego sean más altos y estrechos que los fuegos que no rotan. En efecto, dado que en estos vórtices prácticamente no entra aire (salvo en la base), disponen de menos oxígeno para la combustión, así que parte de los gases deben ascender bastante por el interior hasta que encuentran suficiente oxígeno para arder.

La imponente columna de gases calientes y poco densos genera una zona de muy baja presión en la base del remolino, lo que también resulta muy peligroso. Cerca del suelo, la fricción ralentiza la rotación y reduce la fuerza centrífuga que trata de expulsar el aire al exterior. Dado que la fuerza que lo atrae hacia dentro (vinculada a la diferencia de presiones) no cambia, el vórtice acaba actuando como una aspiradora gigante y succiona en su base tanto aire como escombros en llamas. Estos restos ascienden a velocidades extremas en el centro del remolino y son expulsados desde una gran altura, lo que genera nuevos incendios impredecibles.

SOBRE EL TERRENO

Aunque sabemos mucho sobre la física de los tornados de fuego, seguimos sin poder predecir dónde y cuándo ocurrirán. Pero una cosa está clara: dada la escasa frecuencia con que se producen estos fenómenos (y aunque los incendios más grandes e intensos siempre son capaces de concentrar la vorticidad), el factor fundamental para que aparezcan parece ser la presencia de una potente fuente de rotación.

Los estudios de casos concretos revelan, por ejemplo, que uno de los lugares donde es más probable que se forme un tornado de fuego es la ladera de sotavento de una montaña. El viento que sopla alrededor de la montaña se arremolina en esa zona, como el agua de un río al sortear una gran roca. Si se inicia allí un incendio, puede concentrar esa rotación y estirar la estructura resultante hasta engendrar un tornado de fuego. No obstante, también pueden surgir vórtices ardientes en terrenos planos y sin que haya mucho viento. Por ejemplo, un gran remolino de fuego registrado en Kansas pudo deberse al choque de un frente frío que pasaba sobre un campo incendiado contra el aire ambiental cálido. Y un estudio realizado en 2007 por Rui Zhou y Zi-Niu Wu, de la Universidad Tsinghua, en Pekín, demostró que una serie de incendios dispuestos en determinadas configuraciones (una situación que puede darse cuando un incendio arroja brasas delante de él e inicia otros fuegos) podrían llegar a generar su propia rotación, al hacer que circulen corrientes de aire por el terreno situado entre los distintos focos.

Así que ¿de dónde provenía la rotación que causó el letal tornado del incendio Carr? Dado que se produjeron varios remolinos de fuego antes del gran tornado, parece evidente que en la zona existía una vorticidad anormalmente elevada. Movido por una corazonada, le pedí a Natalie Wagenbrenner, una compañera del Laboratorio de Ciencias del Fuego de Missoula, que simulara por ordenador las condiciones meteorológicas de aquel día. Sus resultados mostraron que una masa de aire frío y denso procedente del océano Pacífico se vio empujada al interior y sobrevoló una cadena montañosa situada al oeste de Redding. Dado que ese aire era mucho más pesado que el aire caliente del valle de Sacramento (aquel día, el aeropuerto de Redding registró una temperatura máxima de 45 grados Celsius, un valor sin precedentes), la gravedad hizo que descendiera aceleradamente por las laderas, como una corriente de agua que fluye cuesta abajo. Extrañamente, estos fuertes vientos superficiales se detuvieron de forma abrupta justo en el lugar donde se formó el tornado de fuego.

¿Qué pasó con el viento? Al final entendí que había experimentado un salto hidráulico, el equivalente atmosférico de lo que ocurre con el agua que cae por el aliviadero de una presa. Cuando esta choca a gran velocidad contra la masa de agua más lenta que tiene debajo, la superficie del líquido se eleva, dando lugar a una ola que permanece en esa posición y marca la frontera entre ambos flujos. Y en esa región se forman intensos remolinos. De forma análoga, cuando el aire frío y denso que descendía con rapidez por las laderas impactó contra la masa de aire más lento que había en el valle de Sacramento, probablemente generó la intensa rotación que dio lugar al tornado del incendio Carr. En un artículo publicado en 2018, Neil P. Lareau, de la Universidad de Nevada, y sus colaboradores especularon que los pirocumulonimbos (que alcanzaron altitudes de más de once kilómetros incluso mientras se formaba el tornado) ayudaron a estirar considerablemente el vórtice. Al hacerlo, también lo habrían estrechado, acelerando aún más su rotación.

Si los incendios forestales siguen haciéndose cada vez más extensos, es posible que observemos estos fenómenos letales con mayor frecuencia. Nuestro único consuelo es que estudiarlos cuidadosamente podría ayudar a prevenir nuevas tragedias. Tengo la esperanza de que esas investigaciones, junto a los avances en materia de predicción meteorológica y potencia computacional, nos permitan emitir alertas de tornados de fuego —y tal vez salvar vidas— en un futuro no muy lejano. IyC

PARA SABER MÁS

Fire whirls, fire tornadoes and firestorms: Physical and numerical modeling. Robert N. Meroney en *Proceedings of PHYSMOD 2003*, editado por Giampaolo Manfrida y Daniele Contini. Firenze University Press, 2003.

Vortices and wildland fire. Jason M. Forthofer y Scott L. Goodrick en *Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: Volume 1 for fire managers*. Paul A. Werth et al. Estación de Investigación del Noroeste del Pacífico del Servicio Forestal de EE.UU., noviembre de 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Remolinos de fuego azul. Robert Frederick en *IyC*, mayo de 2017.

MEDIOAMBIENTE

El trópico llega al Mediterráneo



Los efectos del cambio climático resultan cada vez más evidentes también en las aguas del Mediterráneo, con consecuencias negativas para la biodiversidad y los ecosistemas

Roberto Danovaro

EN RIESGO POR EL CALOR: Un banco de salpas (*Sarpa salpa*) nada sobre una pradera de *Posidonia*, en el cabo de Gata, Almería. Ambientes mediterráneos como este se encuentran en riesgo debido al cambio climático.

Roberto Danovaro es ecólogo, profesor de biología marina en la Universidad Politécnica de Las Marcas en Ancona y presidente de la estación zoológica Anton Dohrn en Nápoles. Estudia la biodiversidad y el ecosistema marino y el impacto del cambio climático en ellos. Ha sido galardonado por esta labor.



El cambio climático está alterando las características físicas y químicas del mar y, con ello, el metabolismo y el ciclo reproductor de multitud de especies, así como el equilibrio entre ellas. Los efectos no se extienden por igual sobre el mapa, sino «a manchas»: varían según la latitud y se concentran en ciertas regiones. El mar Mediterráneo es una de ellas.

Además, al contrario de lo que se pensaba hasta hace poco, los efectos del calentamiento global están calando con rapidez hasta las profundidades marinas. En la franja situada entre 200 y 11.000 metros hay ecosistemas que conforman el bioma más extenso del planeta, una vasta porción de la biosfera. Estos ecosistemas profundos, carentes de luz y, por tanto, de fotosíntesis, ocupan más del 65 por ciento de la superficie terrestre y albergan más del 90 por ciento de los organismos marinos. Son fundamentales, pues, no solo por la enorme biodiversidad que acogen, sino por su capacidad de renovar la producción de los océanos a lo largo del tiempo. En particular, las fosas marinas constituyen los principales motores de la regeneración de los nutrientes inorgánicos necesarios para el crecimiento de las algas y las plantas marinas.

En la mayor parte de los ecosistemas profundos, las condiciones ambientales permanecen notablemente constantes a lo largo del tiempo; solo cambian a escala geológica. Así que el impacto de las variaciones puede ser muy importante, sobre todo en los organismos que se caracterizan por un crecimiento lento y una maduración sexual tardía.

UN OCÉANO EN MINIATURA

El mar Mediterráneo está experimentando grandes cambios, de ahí que haya sido propuesto como modelo para predecir las respuestas de los océanos al cambio climático. Es, en definitiva, un «océano en miniatura». Semicerrado entre el estrecho de Gibraltar por el oeste y el del Bósforo por el este, representa menos del 1 por ciento de la superficie de los océanos y contiene el 0,3 por ciento de las aguas. Puede ser descrito como una suerte de enorme lago salado, con una profundidad media de 1450 metros (contra los 3750 metros del océano). Por esa escasa profundidad, sus aguas se calientan más rápido que las de cualquier océano. La mayoría de los organismos que alberga son ectotermos, es decir, su temperatura corporal es idéntica a la del ambiente marino circundante, por lo que su metabolismo cambia al compás de la temperatura ambiental.

El Mediterráneo es también una zona en la que ya se han verificado numerosos efectos del calentamiento global. La temperatura de la superficie ha ido aumentando sin género de dudas desde la década de 1960, con frecuentes episodios de sobrecalentamiento de las aguas superficiales desde finales de los 90 que han provocado notables pérdidas de bentos, las formas de vida que se mantienen en contacto directo con el fondo. No es necesario ser investigador para darse cuenta de los cambios. Basta con ir a la playa.

Tuve pruebas de ello hace algunos veranos en Sicilia, cuando una mañana temprano vi un enorme cangrejo corriendo por la arena que luego desapareció en un agujero. Era un cangrejo fantasma, una especie típicamente tropical. La playa estaba salpicada de agujeros de entrada a las madrigueras de estos crustáceos, que pocos meses antes habían desembarcado en Italia, listos para extenderse hacia el norte. Junto con los cangrejos

EN SÍNTESIS

Los mares sufren el calentamiento global y una de las cuencas que más nota sus consecuencias es la mediterránea. Las características fisicoquímicas están cambiando por el aumento de la temperatura en las aguas superficiales y profundas. Esto está provocando una pérdida de biomasa en la base de la red trófica, un aumento de la acidez y una caída del oxígeno disuelto.

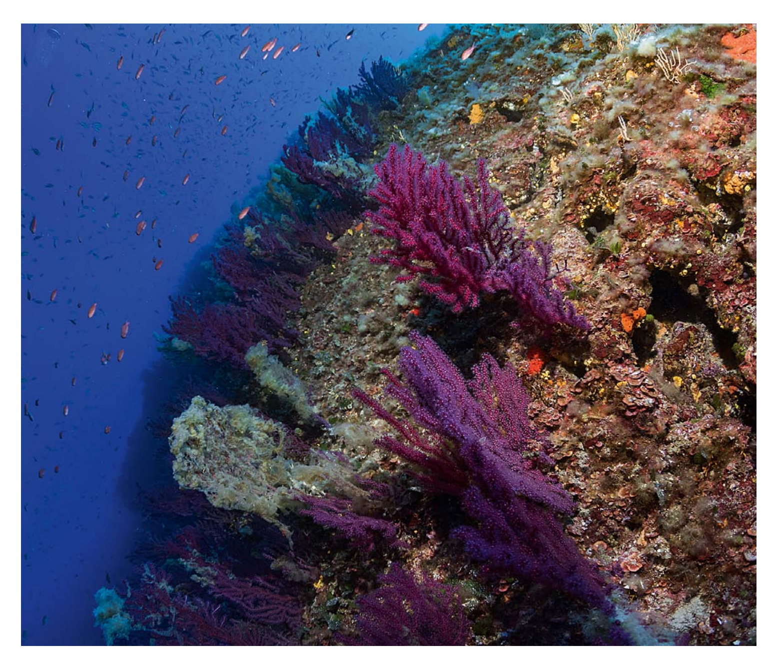
El aumento de la temperatura convierte las aguas mediterráneas en un lugar adecuado para nuevas especies exóticas.

Todos estos efectos, sumados a otros de igual origen antropogénico, ponen en riesgo muchos ecosistemas mediterráneos de alto valor ecológico y gran importancia económica.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/DAMOCEAN/ISTOCK

Mortandad estival

Las condiciones que imperan durante el verano en el Mediterráneo, caracterizadas por las temperaturas altas y la escasez de alimento, sumen en una «dormancia estival» a muchos organismos filtrantes, como esponjas o moluscos bivalvos, y someten a estrés a numerosos corales y gorgonias. Los dilatados períodos de calor anormal pueden causar grandes mortandades de invertebrados bentónicos. Desde 1999, en algunas zonas han llegado a morir más del 80 por ciento de las gorgonias y las esponjas en pocas semanas. El estrés causado por el calor las debilita ante las bacterias infecciosas: en el mar de Liguria, numerosas gorgonias, como *Paramuricea clavata* (*fotografía*), murieron debido a infecciones causadas por vibrios. Ciertos parásitos digestivos parecen ser la causa de la mortandad de bivalvos gigantes, como la nacra (*Pinna nobilis*), así como la de grandes meros. La recuperación de las especies tras fenómenos similares generalmente lleva mucho tiempo. Al cabo de tres años, las colonias supervivientes o de nueva formación aún son mucho más pequeñas que antes del episodio de mortandad.



La gorgonia roja (*Paramuricea clavata*) es una de las especies más comunes en el Mediterráneo.

GETTY IMAGES/ANDREA IZZOTTI/ISTOCK

fantasma, una gran variedad de peces tropicales, como el pez liebre, el pez ballesta o el pez globo espinoso, también están entrando en el Mediterráneo y llenando las redes de los pescadores de Calabria, Apulia y Sicilia. Esta fauna exótica procedente de otros mares es una prueba evidente del cambio climático en curso. Las especies tropicales asaltan la cuenca mediterránea porque encuentran condiciones favorables; habituadas a climas cálidos, se encuentran en ella mejor que las especies autóctonas, estresadas por el calor excesivo.

El Mediterráneo alberga unas 17.000 especies, lo que supone el 7,5 por ciento de la biodiversidad marina mundial. Se estima que un millar son foráneas y provienen del Atlántico, del mar Rojo o de otras cuencas exóticas; penetran a través del estrecho de Gibraltar o del canal de Suez, recientemente ampliado, o transportadas en los cascos o en las aguas de lastre de los barcos. Otras muchas son liberadas por acuariófilos que, por ejemplo, deciden no mantener más a «Nemo» en el acuario y lo liberan al mar, como tal vez sucediera en la isla de Elba, donde se han hallado ejemplares de pez payaso; o bien fueron introducidas para compensar la desaparición de una especie autóctona, como en el caso de la almeja japonesa (*Ruditapes philippinarum*) en lugar de la almeja fina (*R. decussatus*) en el Adriático. Una vez en el Mediterráneo, gracias a las condiciones ambientales cada vez más parecidas a las tropicales, muchas encuentran un hogar y se instalan de modo permanente. Y al hacerlo, compiten con las autóctonas o las depredan, determinando en unos casos su alejamiento, en otros su regresión o su descenso a mayor profundidad para limitar el daño. Ejemplos de ello son el alga *Caulerpa cylindracea*, una intrusa que forma extensas alfombras y compite por el espacio, especialmente con otras macroalgas y plantas endémicas como la *Posidonia*; o la medusa *Rhopilema nomadica*, que con sus más de 60 centímetros transforma grandes extensiones de mar en un caldo gelatinoso.

CADA VEZ MÁS CALOR

En el mar, la temperatura disminuye notablemente con la profundidad y el Mediterráneo no es una excepción. Sin embargo, nuestro mar es mucho más cálido que otros situados en las mismas latitudes, con temperaturas superficiales que llegan a alcanzar los 30 grados Celsius en verano, como en el ecuador. Y, a diferencia de los océanos, las temperaturas abisales nunca descienden por debajo de los 13 grados, un valor que supera en más de diez las mínimas del océano Atlántico frente a Gibraltar y las de todos los océanos a la misma profundidad. Esto hace que la fauna mediterránea difiera de la de los demás océanos, con gran abundancia de endemismos, exclusivos de la cuenca. Ahora bien, el Mediterráneo se está calentando, tanto en la superficie, donde la temperatura del Adriático, por ejemplo, ha aumentado más de 1,8 grados en las décadas precedentes, como en aguas profundas, donde ha subido 0,2 grados en la última veintena. En el caso de los océanos, los pronósticos indican que la temperatura de las aguas abisales (de 3000 a 6000 metros) podría aumentar hasta 1 grado en los próximos ochenta años. Pero el dato más alarmante es que el ritmo de calentamiento de los últimos veinte duplica como mínimo el de los cuarenta años anteriores.

Todo esto no sucederá sin consecuencias. La variación de la temperatura afectará ostensiblemente a la biodiversidad marina y a gran escala espacial. Los principales problemas para los habitantes del Mediterráneo atañen precisamente al límite de la tolerancia térmica. Las especies afines a las aguas frías, originarias de latitudes altas, no soportan bien los cambios repentinos

Los bioconstructores del mar

Los ingenieros del ecosistema marino son aquellos organismos cuya actividad modifica el ambiente y aumenta la complejidad estructural del hábitat, modificando la biomasa y la biodiversidad locales, con múltiples efectos ecológicos. Entre ellos se encuentran:



Corales, gorgonias, ostras, gasterópodos vermétidos, gusanos serpúlidos y sabélidos, y algas coralinas construyen arrecifes de carbonato de calcio donde se asientan otros organismos, que hallan en ellos sustento y cobijo (*en la imagen, corales y gorgonias de las islas Medas*).



Muchas plantas marinas (*en la imagen,* Posidonia) y numerosas macroalgas forman praderas costeras; de esta manera, modifican el flujo del agua, acumulan sedimentos, permiten el establecimiento de larvas y brindan alimento y refugio contra la depredación.

de temperatura y en períodos de calor extremo y prolongado pueden sucumbir de forma masiva. El calentamiento del agua también repercute en el ciclo biológico, la longevidad y la tasa metabólica de los organismos marinos. Los habitantes de los ambientes tropicales, ya adaptados a las temperaturas altas, se están expandiendo, mientras que aquellos que prefieren las bajas se hallan en apuros y ven reducido el período propicio para la reproducción. La distribución vertical de las especies también queda alterada, pues algunas son empujadas hacia mayores profundidades, donde encuentran un ambiente más fresco, en tanto que otras propias de aguas someras, y por ello más vulnerables, desaparecen. El mar profundo se caracteriza por la estabilidad de la temperatura durante milenios; tolera poco los cambios bruscos, como los registrados en los últimos años.

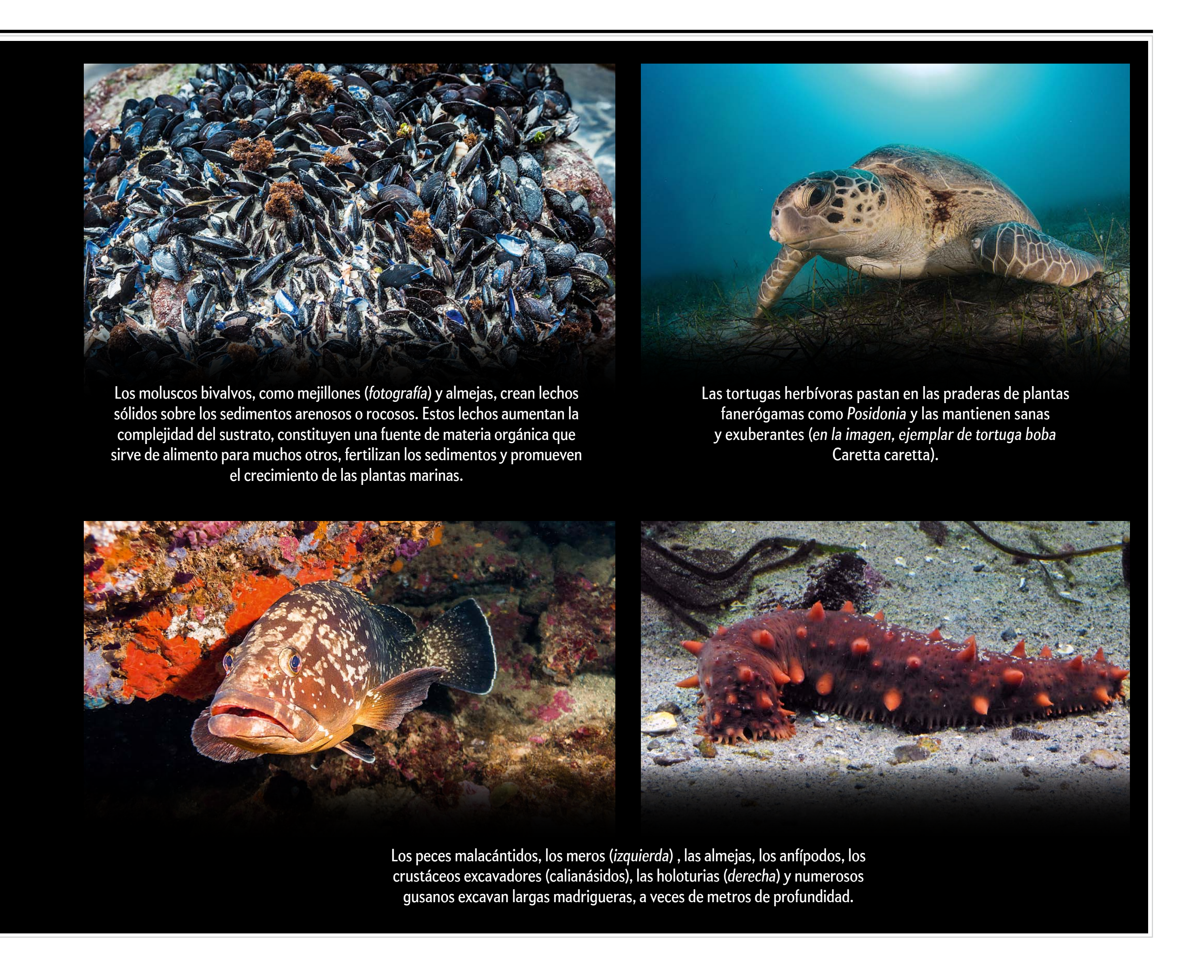
Y también pueden entrar en juego fenómenos climáticos anómalos. Como el llamado «transitorio», que en la década de 1990 desencadenó en el Mediterráneo oriental un repentino hundimiento de las aguas superficiales, más cálidas y saladas, que empujó hacia la superficie las aguas profundas, ricas en sales nutrientes. En pocos meses, este proceso causó un fuerte cambio en la biodiversidad, con un reemplazo de en torno al 50 por ciento de las especies presentes a 1000 metros de profundidad, lo que demuestra que hasta los ambientes profundos pueden cambiar rápidamente debido a las anomalías climáticas.

RIESGO DE HAMBRUNA

Uno de los primeros efectos del cambio climático es la alteración de la producción primaria global, es decir, la cantidad de biomasa, en gran parte compuesta de algas microscópicas, que representa la base de la red alimentaria (o trófica) marina. Según los modelos ecológicos, en las próximas décadas la producción de biomasa vegetal en las latitudes medias y en los trópicos podría disminuir hasta la mitad. Este descenso supondrá una suerte de lenta «hambruna» para los peces y otros consumidores, que limitará su crecimiento y reproducción, con repercusiones para la pesca en todo el mundo.

La vida en las profundidades depende en gran medida de la «lluvia» de materia orgánica que la fotosíntesis produce en la zona superficial iluminada. Por regla general, el aporte que recibe el fondo disminuye exponencialmente conforme aumenta la profundidad, debido al consumo de la materia orgánica durante el descenso. Pero además de reducir la producción primaria,

GETTY IMAGES/ELOI OMELLA/ISTOCK (*corales y gorgonias*); GETTY IMAGES/MGOKALP/ISTOCK (*Posidonia*)



Los moluscos bivalvos, como mejillones (*fotografía*) y almejas, crean lechos sólidos sobre los sedimentos arenosos o rocosos. Estos lechos aumentan la complejidad del sustrato, constituyen una fuente de materia orgánica que sirve de alimento para muchos otros, fertilizan los sedimentos y promueven el crecimiento de las plantas marinas.

Las tortugas herbívoras pastan en las praderas de plantas fanerógamas como *Posidonia* y las mantienen sanas y exuberantes (*en la imagen, ejemplar de tortuga boba* Caretta caretta).

Los peces malacántidos, los meros (*izquierda*), las almejas, los anfípodos, los crustáceos excavadores (calianásidos), las holoturias (*derecha*) y numerosos gusanos excavan largas madrigueras, a veces de metros de profundidad.

GETTY IMAGES/AFRICANPIX/ISTOCK (*mejillones*); GETTY IMAGES/MUTLU KURTBAS/ISTOCK (*tortuga*); GETTY IMAGES/ELOI OMELLA/ISTOCK (*mero*); GETTY IMAGES/JAYAKESAVAN/ISTOCK (*holoturia*)

el calentamiento de las aguas superficiales está creando una «barrera física» (de densidad) entre las aguas superficiales, más cálidas, y las aguas profundas, más frías, que reduce la cantidad de lluvia que cae hasta el fondo marino.

Los efectos más negativos del calentamiento superficial se esperan en el océano Índico, donde para finales de siglo se vislumbra una disminución de hasta el 55 por ciento del aporte de nutrientes que llega al fondo. El Mediterráneo no escapará a ese fenómeno, especialmente en la cuenca oriental, donde la penuria alimentaria ya resulta evidente. El este del Mediterráneo figura entre los entornos más pobres en nutrientes del planeta: el aporte a través de la columna de agua puede ser de 15 a 80 veces menor que en la cuenca occidental. A medida que los recursos menguan durante el descenso hacia las fosas oceánicas, la biodiversidad y la biomasa disminuyen drásticamente. Y en ellas la escasez de alimentos tendrá varios efectos negativos: reducirá el crecimiento, la supervivencia y el reclutamiento de los pobladores del fondo. La megafauna, con grandes depredadores como los escualos, y también otros organismos de pocos centímetros a metros de longitud, como gorgonias y corales, serán los primeros en sufrir el impacto de tales cambios, en tanto que los más pequeños y los microbios podrán salir beneficiados de ellos.

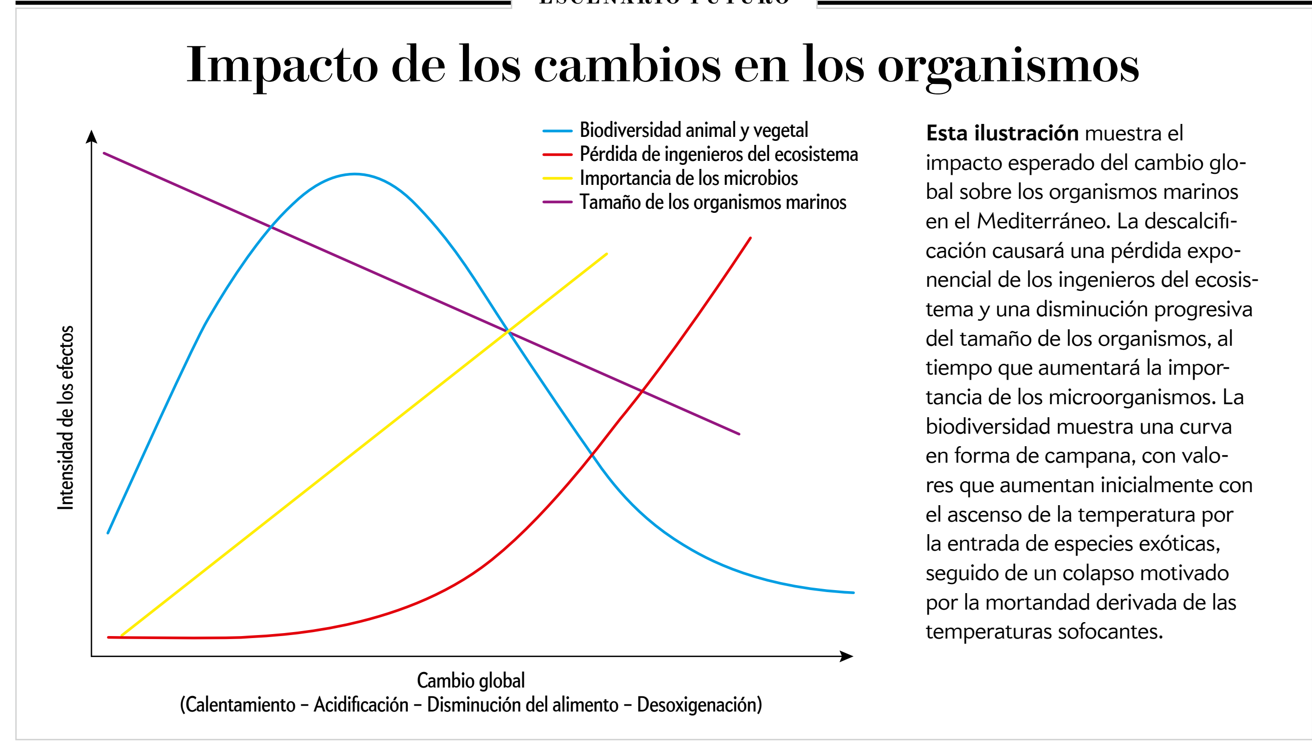
CUIDADO CON EL OXÍGENO

Otro problema que deben afrontar las especies marinas en un mundo cada vez más cálido guarda relación con la respiración. La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura. A medida que esta aumenta, disminuye la cantidad de oxígeno que se disuelve en el líquido. Por tal razón, cada vez es mayor la extensión marina que se vuelve hipóxica, pobre en oxígeno: menos de 0,5 mililitros de este elemento por litro de agua. Las concentraciones normales en el agua de mar (unos 10 mililitros de oxígeno por litro) son ya 20 veces más bajas que la concentración atmosférica (200 mililitros por litro de aire) y son muy pocos los organismos especializados capaces de sobrevivir en tales condiciones de escasez.

El resultado es que vastas regiones de los océanos se están despoblando, lo cual está generando un fuerte impacto en los procesos biogeoquímicos. Estos fenómenos aún no se han observado en el Mediterráneo, a excepción de algunos episodios de hipoxia acaecidos en el Adriático superior, en relación con

ESCENARIO FUTURO

Impacto de los cambios en los organismos



Esta ilustración muestra el impacto esperado del cambio global sobre los organismos marinos en el Mediterráneo. La descalcificación causará una pérdida exponencial de los ingenieros del ecosistema y una disminución progresiva del tamaño de los organismos, al tiempo que aumentará la importancia de los microorganismos. La biodiversidad muestra una curva en forma de campana, con valores que aumentan inicialmente con el ascenso de la temperatura por la entrada de especies exóticas, seguido de un colapso motivado por la mortandad derivada de las temperaturas sofocantes.

DANILO SOSSI

condiciones inusuales de estratificación y calentamiento de las masas de agua. Pero no podemos excluir que en el futuro el auge de la temperatura no haga más probable el surgimiento de áreas hipóxicas.

Una de las consecuencias directas de la depauperación del oxígeno es la disminución en la supervivencia de los embriones de los animales ovíparos, que se reproducen con huevos. También están en riesgo las especies de profundidad, como la pailona o tiburón portugués (*Centroscymnus coelolepis*), importante para el Mediterráneo y de distribución casi mundial, porque viven a lo largo de los márgenes continentales a más de 500 metros de la superficie, donde generalmente se dan las condiciones de hipoxia.

MAR ÁCIDO

Se dice que los males nunca vienen solos y para completar la imagen de los cambios que afectan a los mares es preciso añadir los crecientes indicios que demuestran su acidificación. Se trata del descenso del *p*H de las aguas superficiales, a razón de unas 0,1 unidades por década, incluso más (la escala de *p*H va de 0 a 14, con el 0 como indicador de la acidez máxima). Esta acidificación tiene su origen en la abundancia cada vez mayor de dióxido de carbono en la atmósfera, producto de la actividad humana, que se disuelve en el agua formando ácido carbónico [*véase* «La acidificación de los océanos», por Scott C. Doney; Investigación y Ciencia, mayo de 2006].

Ningún rincón del planeta escapa al problema y el Mediterráneo es una de las regiones marinas más sensibles. Su *p*H ha disminuido de promedio hasta 0,16 unidades con respecto a los niveles preindustriales. Ese ritmo de disminución es tres veces mayor que el registrado en la superficie de muchas zonas oceánicas. Pero no termina ahí. Un estudio de tres años llevado a cabo en el estrecho de Gibraltar también ha constatado esa disminución progresiva en aguas intermedias y profundas.

El impacto de la acidificación en los ciclos biogeoquímicos marinos y en los organismos empieza a estar bien documentado gracias a estudios de laboratorio y de campo. El mayor problema del fenómeno radica en el riesgo de desaparición de las especies calcificantes: los valores bajos del *p*H repercuten negativamente en el ritmo de crecimiento, la reproducción y la resistencia a los cambios ambientales de multitud de especies dotadas de esqueletos calcáreos. Sin embargo, la sensibilidad de los organismos marinos a la acidificación varía en general según la especie. Las hay que apenas resultan afectadas, mientras que otras sufren consecuencias graves. De igual modo, pueden quedar afectadas especies importantes desde el punto de vista económico. Tal es el caso del coral rojo (*Corallium rubrum*), presente desde pocos metros bajo la superficie hasta más de 1000 metros de profundidad. Se trata de una especie longeva, que vive más de 200 años, cuyo proceso de calcificación se resiente con la disminución del *p*H. De continuar el proceso, en 2100 algunos organismos que antaño poblaban nuestras aguas estarán al borde de la extinción.

HÁBITATS QUE NECESITAN PROTECCIÓN

Si ampliamos nuestra mirada dejando a un lado las especies o las clases de organismos para centrarnos en los hábitats, la situación, lejos de mejorar, empeora. Muchos hábitats mediterráneos son sumamente vulnerables al cambio climático debido a la combinación de otros factores. Un ejemplo corresponde a los bosques de macroalgas pardas del norte del Adriático, del mar de Liguria y del estrecho de Mesina, que no toleran el calentamiento del agua porque precisan temperaturas bajas. Los hábitats ocupados por los corales costeros y los de aguas profundas constituyen dos ejemplos más: están en riesgo porque requieren aguas frías y son sensibles al aumento de la temperatura y a la acidificación. Además, dicho aumento parece poner en peligro a todos los ambientes de las cuevas, en particular

a las situadas a profundidades algo mayores, afectadas por la afluencia de las aguas cálidas superficiales.

Las comunidades de los taludes continentales y de los cañones profundos, que representan alrededor del 20 por ciento de la superficie oceánica del mundo y son muy abundantes en el Mediterráneo, también están en riesgo ante el aumento de los fenómenos climáticos anómalos. Por ejemplo, la intensificación de fenómenos como las cascadas de agua densa que se dan a lo largo de los taludes arrastra las comunidades de los fondos marinos rocosos, comunidades que no tienen posibilidad de escapar, pues son en gran parte sésiles y viven ancladas al fondo. Entre los hábitats marinos vulnerables al cambio climático cabe mencionar también los formados por los llamados bioconstructores. Muchos organismos son considerados «ingenieros del ecosistema» porque crean nuevos hábitats que dan cobijo a otras muchas formas de vida. La pérdida de estos bioconstructores, altamente sensibles a las variaciones de la temperatura y la acidificación, tendrá efectos en cascada sobre la biodiversidad marina.

Proteger los ecosistemas marinos es pues un compromiso fundamental. Desempeñan un papel tan importante para la humanidad que solo puede cuantificarse y apreciarse en parte. Nos dotan de una serie de bienes, como el pescado y otros recursos, y de servicios, como la producción de oxígeno o la protección de la costa contra la erosión y las inundaciones, que son necesarios para sustentar nuestro bienestar y nuestra civilización. Resulta difícil calcular el valor económico de los ecosistemas marinos. En el caso del Mediterráneo, estudios recientes cifran el valor anual de los recursos biológicos (principalmente de la pesca) que aportan a las economías de los países ribereños en más de medio billón de euros. Son activos que deben protegerse, ya que solo un mar sano y rico en biodiversidad podrá resistir el impacto del cambio climático y de la acción humana.

¿Y EL FUTURO?

Los efectos negativos del cambio climático se suman a los de otros impactos de origen antrópico, lo que multiplica sus efectos. Desde hace más de diez años, la pesca en el Mediterráneo está prohibida a menos de 1000 metros de profundidad, un veto que no siempre se respeta. La mayoría de las especies de interés comercial son víctimas de la sobrepesca y, no menos grave, en muchos casos su captura provoca la destrucción del hábitat. Además, la contaminación química y el aumento del plástico y de otros desechos contribuyen a delinear un panorama ambiental al borde del colapso. El desarrollo de las técnicas para la extracción de metales raros y preciosos en el mar abierto trae consigo la destrucción del fondo marino.

Pero incluso aunque detuviéramos esos impactos directos, persistirían los impactos indirectos, vinculados a los cambios globales que están modificando profundamente el mar Mediterráneo. Estos cambios están alterando las redes tróficas, los ciclos biogeoquímicos, la distribución geográfica de las especies y sus ciclos de vida. También están causando la extinción a escala local de algunas especies y la sustitución de especies autóctonas por otras exóticas e invasoras. Sin duda, los efectos del cambio serán generalizados y repercutirán en la economía, pues afectarán a especies comerciales. Y podrían ser más fuertes de lo esperado a tenor de lo observado hasta la fecha, debido a la interacción de la temperatura, el oxígeno y el *p*H. Entre 2050 y 2100 podríamos presenciar una pérdida general de bienes y servicios proporcionados por los ecosistemas (pesca, producción de oxígeno y captura de dióxido de carbono, entre otros).

Para evitar este lúgubre escenario será necesario emprender la restauración de los ecosistemas destruidos. A este respecto, este mes de junio estaba prevista la Conferencia sobre los Océanos de la ONU, donde se iban a debatir y promover iniciativas en el marco de sus Objetivos de desarrollo sostenible para el 2030, en concreto el referente a la vida submarina. Lamentablemente, el simposio ha sido aplazado *sine die* por la pandemia de COVID-19. No obstante, ya se están realizando estudios piloto, como los del proyecto MERCES, que, financiado por la Unión Europea, definirá los protocolos para la restauración de los hábitats costeros y profundos. Otras iniciativas europeas en curso, como el proyecto IDEM, pretenden examinar el estado de salud de los ambientes profundos, los menos conocidos del Mediterráneo, también en respuesta al cambio climático. Y en un ámbito más general, la Unión Europea mantiene una postura común en la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina, que insta a los estados miembros a garantizar en 2020 una protección ambiental efectiva hasta el límite de las 200 millas náuticas desde la costa. Pese a todos los obstáculos, si logramos restaurar los ecosistemas marinos, mejorar la calidad ambiental y proteger la biodiversidad, fomentando la conciencia sobre la necesidad de protegerlos, conseguiremos que los mares sean menos vulnerables al cambio climático y más resilientes, esto es, capaces de recuperar antes su estado original tras las alteraciones. Son metas importantes, porque el Mediterráneo no es solo nuestro presente, sino también, y ante todo, nuestro futuro. IyC

PARA SABER MÁS

Biodiversity issues for the forthcoming tropical Mediterranean Sea. Carlo N. Bianchi en *Hydrobiologia*, vol. 580, n.º 1, artículo n.º 7, págs. 7-21, 2007.
Climate influence on deep sea populations. Joan B. Company et al. en *PLoS ONE*, vol. 3, n.º 1, e1431, 2008.
Marine extinctions. Patterns and processes. F. Boero et al. en *CIESM Workshop Monographs*, vol. 45, págs. 5-19, 2013.
The deep-sea under global change. Roberto Danovaro et al. en *Current Biology*, vol. 27, n.º 11, págs. R461-R465, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La salud del Mar Mediterráneo. Joandomènec Ros en *IyC*, agosto de 1994.
El Mediterráneo, un delicado océano en miniatura. Javier Ruiz Segura y Joaquín Tintoré en *IyC*, abril de 2016.
El redescubrimiento del Mediterráneo. Josep Maria Gili, Andrea Gori y Susana Requena en *IyC*, mayo de 2017.
Redefinir la protección de los océanos. Olive Heffernan en *IyC*, abril de 2018.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

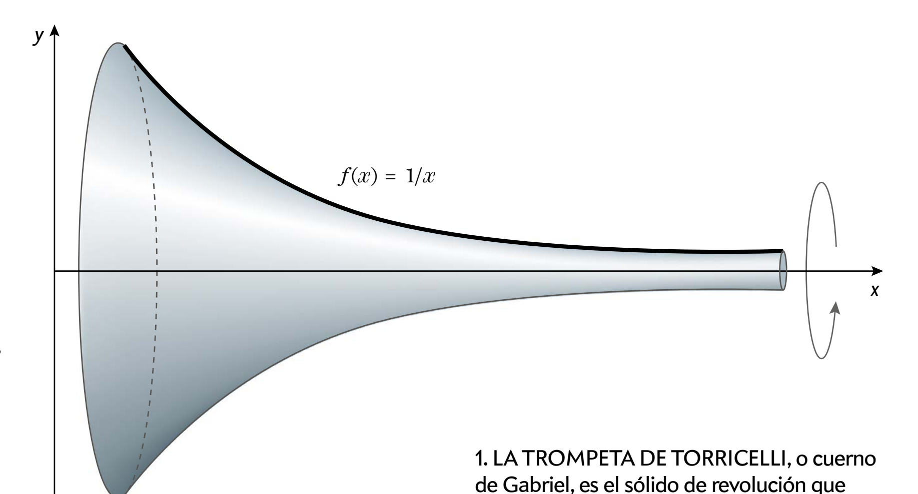
La trompeta de Torricelli y el pastel nupcial de Hilbert

¿Cómo puede una superficie infinita encerrar un volumen finito?

Evangelista Torricelli (1608-1647) fue alumno de Galileo Galilei y, aunque realizó contribuciones relevantes en física, es sobre todo recordado como el inventor del barómetro. Menos conocido es que en 1641 dejó una huella imperecedera en la matemática al descubrir un paradójico objeto geométrico que bautizó como «sólido hiperbólico agudo». Dicho objeto, que recuerda a una trompeta o a un cuerno extravagantemente largos, no es otro que el sólido de revolución que se obtiene al hacer girar la gráfica de la función $f(x) = 1/x$ alrededor del eje de abscisas para $x \geq 1$ (*véase la figura 1*).

La trompeta de Torricelli, que es como se conoce hoy, posee la insólita propiedad de encerrar un volumen finito en el interior de una superficie infinita. Quizá por eso, los más dados a lo épico lo llaman «el cuerno de Gabriel», en referencia al instrumento con el que el arcángel Gabriel anunciará el día del Juicio Final.

Torricelli comunicó su desconcierto a Bonaventura Cavalieri, uno de los creadores de la técnica que había empleado para calcular el área y el volumen, quien al hacerlo público provocó una encendida controversia en la que participaron matemáticos y filósofos de la talla de Isaac Barrow o John Locke. La naturaleza paradójica del engendro geométrico resultó tan incómoda que Thomas Hobbes comentó: «Para entender el sentido de esto no se requiere ser geómetra o lógico, sino más bien estar loco».



1. LA TROMPETA DE TORRICELLI, o cuerno de Gabriel, es el sólido de revolución que se obtiene al hacer girar en torno al eje X la función $f(x) = 1/x$ para $x \geq 1$. El propio Torricelli quedó sorprendido al comprobar que este objeto, infinitamente largo y de área también infinita, encerraba un volumen finito.

El cuerno de Gabriel

El procedimiento que empleó Torricelli para obtener el volumen de su sólido es heredero del método de exhaustación griego. En términos modernos, calculó el volumen como la suma de los volúmenes de las infinitas rebanadas en que el objeto puede descomponerse.

Esta técnica resulta especialmente sencilla en el caso de un sólido de revolución generado a partir de una función cualquiera $f(x)$. En tal situación, el objeto puede descomponerse en infinitas lonchas circulares de área $\pi[f(x)]^2$ y altura infinitesimal dx. El volumen de cada una de ellas será $\pi[f(x)]^2dx$, y sumándolas todas llegamos a la siguiente expresión general para el volumen del sólido entre los puntos $x = a$ y $x = b$:

$$V = \int_a^b \pi[f(x)]^2\, dx\ .$$

Si, por ejemplo, tomamos la función $f(x) = \sqrt{R^2 - x^2}$ entre $a = -R$ y $b = R$, la cual describe media circunferencia de radio R, podremos comprobar con facilidad que nuestra fórmula arroja el conocido volumen de una esfera: $(4/3)\pi R^3$.

De igual modo, existe también una expresión general para calcular el área de la superficie del sólido. Me permitirán que obvie los detalles de cómo llegar hasta ella (aunque como pista señalaré que hace falta usar una versión infinitesimal del teorema de Pitágoras) y que indique directamente el resultado:

$$A = \int_a^b 2\pi f(x)\sqrt{1 + [f'(x)]^2}\, dx\ .$$

Retomando el ejemplo de la esfera, esta fórmula devuelve la conocida expresión $A = 4\pi R^2$.

Si ahora aplicamos estas expresiones a la trompeta de Torricelli, donde $f(x) = 1/x$, y consideramos el intervalo de longitud infinita $[1, \infty)$, obtendremos

$$A = 2\pi \int_1^\infty \frac{1}{x}\sqrt{1 + \frac{1}{x^4}}\,dx > 2\pi \int_1^\infty \frac{1}{x}\,dx = \infty\ ;$$

es decir, un área infinita, tal y como nos dicta la intuición.

Sin embargo, el volumen de nuestro sólido viene dado por

$$V = \pi \int_1^\infty \frac{1}{x^2}\, dx = \pi ,$$

y es por tanto finito, para sorpresa de todas nuestras expectativas.

El lector puede demostrar que, si toma como función generatriz $f(x) = 1/x^2$, tanto el volumen como la superficie resultan finitos. Pero el fenómeno que sorprendió a Torricelli y a sus contemporáneos no es exclusivo de la función $f(x) = 1/x$: se producirá siempre que consideremos como función generatriz una función potencial del tipo $f(x) = 1/x^\alpha$ con exponente $1/2 < \alpha \leq 1$.

La tarta de Hilbert

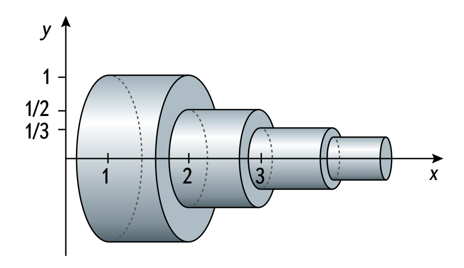
Nuestra intuición geométrica se niega a creer que un sólido que se extiende infinitamente y que presenta una superficie infinita pueda encerrar un volumen finito. Pero ¿es realmente paradójico este resultado?

Pensemos en un cilindro de plastilina de radio $r(h) = 1/h$ y longitud $L(h) = h^2$, donde h es un número cualquiera. Su volumen será $V = \pi r^2 L = \pi$ y su área lateral $A = 2\pi r L = 2\pi h$. Si ahora lo estiramos de modo que se mantenga la relación entre el radio y la longitud, veremos que, mientras que el volumen permanece constante, el área lateral crece sin límite.

Para arrojar algo más de luz sobre la cuestión, podemos usar un análogo discreto al cuerno de Gabriel que conduce al mismo resultado. Si tomamos como función generatriz la función lineal a trozos

$$f(x) = 1/\lfloor x \rfloor ,$$

donde $\lfloor x \rfloor$ denota la parte entera de x, obtendremos una superficie de revolución a la que llamaremos «tarta nupcial de Hilbert», en honor al célebre matemático y su hotel homónimo, y debido a que la figura se asemeja a un pastel de bodas con infinitos pisos (*véase la figura 2*).



2. LA TARTA NUPCIAL DE HILBERT es el sólido de revolución generado por la función $f(x) = 1/\lfloor x \rfloor$, donde $\lfloor x \rfloor$ representa la parte entera de x. Esta figura también encierra un volumen finito en un área infinita.

Calculemos ahora el volumen y la superficie. Cada piso es un cilindro de radio $1/n$ y altura 1, por lo que su volumen será

$$V_n = \pi/n^2.$$

Por tanto, el volumen total de nuestra tarta sin fin vendrá dado por

$$V = \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^3}{6} ,$$

una cantidad finita, como en el caso de la trompeta de Torricelli.

¿Qué ocurre con la superficie? Esta se halla formada por las tapas anulares superiores de cada piso cilíndrico y por sus laterales. Podemos calcular la contribución de todas las tapas anulares pensando como un físico: si «cerramos el telescopio» colapsando todas las tapas en el plano YZ, el resultado será un círculo de radio 1 y, por tanto, con un área total igual a π.

Sin embargo, dado que el área lateral del enésimo piso es

$$A_n = 2\pi/n,$$

la contribución total de las superficies laterales será

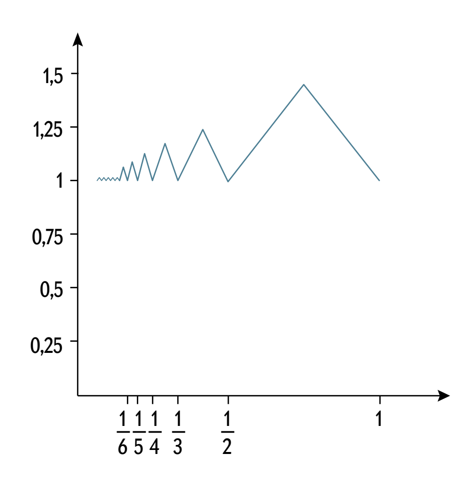
$$A = 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \infty ,$$

que en este caso es divergente porque lo es la serie armónica (la suma de $1/n$ entre $n = 1$ e infinito). De modo que este objeto ilustra esencialmente la misma aparente paradoja que el cuerno de Gabriel: un sólido con área infinita pero volumen finito. ¿No le resulta menos paradójico ahora, donde la demostración recae sobre la convergencia de series?

La paradoja del pintor

Poniéndonos juguetones, podríamos decir que es posible comerse todo el pastel nupcial de Hilbert, pero no lamerlo. De hecho, la paradoja de la trompeta de Torricelli se conoce también como «paradoja del pintor»: dado que la trompeta posee un volumen finito, podemos llenarla con una cantidad finita de pintura, y puesto que en ese caso la superficie interna se pintaría, habríamos pintado una superficie infinita con una cantidad finita de pintura. ¿Cómo es posible?

Sin entrar en la naturaleza atómica de la pintura, un físico podría replicar diciendo que, como el cuerno de Gabriel se extiende hasta el infinito, el tiempo necesario para llenarlo de pintura sería infinito y, por tanto, se trataría de un proceso irrealizable en la práctica.

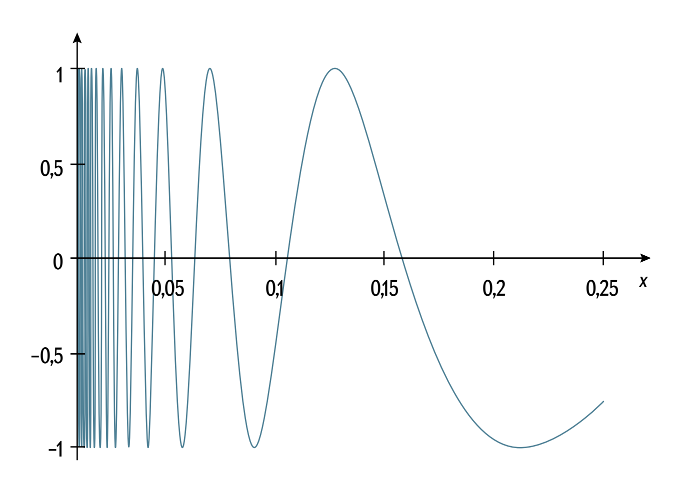


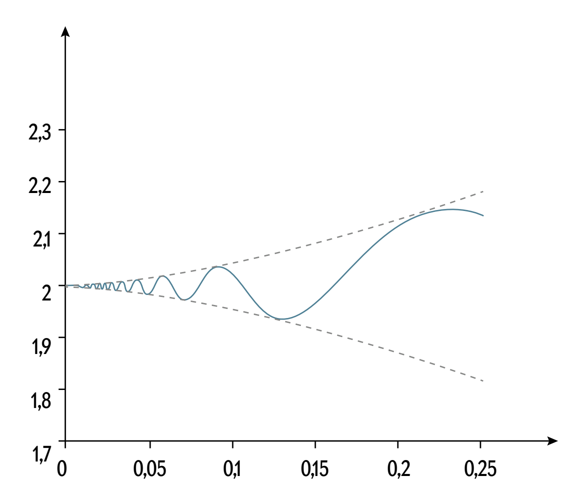
3. LAS EXTRAÑAS PROPIEDADES de la trompeta de Torricelli pueden aparecer también en objetos de longitud finita. Un ejemplo nos lo proporciona el sólido de revolución generado a partir de la función $f(x)$ representada aquí, definida a trozos en el intervalo $[0,1]$ como $f(x) = 1$ si $x = 1/n$ con n natural (incluido $f(0) = 1$), y sucesivos dientes de sierra de longitud total $1/n$ en los intervalos $(1/(n+1), 1/n)$.

No obstante, podríamos poner en aprieto a nuestro físico si lográsemos construir un sólido de propiedades semejantes pero de longitud finita. Para ello, el matemático Mark Lynch propone que tomemos como función generatriz la función lineal definida a trozos en el intervalo $[0,1]$ que vemos en la figura 3. Esta consta de infinitos dientes de sierra centrados en los intervalos $(1/(n+1), 1/n)$ y de longitud total $1/n$, donde n es un número natural.

Puesto que la serie armónica diverge, nuestra gráfica tiene longitud infinita. Y es fácil demostrar a partir de nuestras fórmulas que el sólido de revolución que engendra tiene un área también infinita, pero un volumen finito.

Observemos que la función propuesta por Lynch es continua, pero carece de derivada en una cantidad infinita de puntos: aquellos en los que las rectas se quiebran. El propio Lynch afirma que no podemos construir un ejemplo semejante en un intervalo acotado con una función continua de derivada continua. De hecho, si miramos nuestras fórmulas para el cálculo de volúmenes y superficies, veremos que en los integrandos aparecen $f(x)$ y su derivada. Y si estas funciones son continuas en el intervalo acotado de integración, estarán necesariamente acotadas y sus integrales arrojarán valores finitos.





4. LA FUNCIÓN sen$(1/x)$ (*izquierda*) oscila entre los valores 1 y −1 con una frecuencia cada vez mayor a medida que nos acercamos a $x = 0$. A partir de ella podemos definir la función generatriz $f(x) = 2 + (x/\log x)\operatorname{sen}(1/x)$ para x en $(0,1/4]$ y $f(x) = 2$ en $x = 0$ (*derecha*). Esta última, que no es más que la función sen$(1/x)$ «encajada» entre las curvas $2 \pm x/\log x$, proporciona una versión derivable de la paradoja del pintor.

No obstante, el lector podrá comprobar que la función representada en la figura 4, que es derivable y posee una longitud de arco infinita, genera un sólido de revolución con un volumen finito (puesto que podemos contenerlo en un cilindro de radio y altura finitos) y, sin embargo, posee una superficie infinita. ¿No contradice esto la afirmación anterior?

Sorprendentemente, esta función casi cumple lo imposible, pues tiene una derivada continua en todos los puntos de su intervalo de definición excepto en uno: el punto $x = 0$.

Continuidad, curvas quebradas, derivabilidad... todas estas nociones me empujan a que les hable ahora de objetos fractales llenos de propiedades paradójicas semejantes a las del cuerno de Gabriel. De hecho, el pastel nupcial de Hilbert desprende aromas fractales, puesto que está construido a partir de infinitas versiones de un mismo cilindro en distintos tamaños. Pero como también esta columna se encuentra acotada, pospondremos nuestro análisis para la siguiente. Siempre y cuando Gabriel no reciba la orden divina de tocar su cuerno... aunque, ahora que lo pienso, no sé dónde se iba a colocar para tocarlo. IyC

PARA SABER MÁS

Gabriel's wedding cake. Julian F. Fleron en *The College Mathematics Journal*, vol. 30, págs. 35-38, enero de 1999.

A paradoxical paint pail. Mark Lynch en *The College Mathematics Journal*, vol. 36, págs. 402-04, noviembre de 2005.

Note on Gabriel's horn. Joseph Krenicky y Jan Rychtář en *Furman University Electronic Journal of Undergraduate Mathematics*, vol. 11, págs. 4-7, 2016.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

La cadena de Newton

Bajo ciertas condiciones, una cadena alojada en el interior de un recipiente parece emerger espontáneamente de este. El curioso fenómeno obedece en última instancia a la ley de acción y reacción

En 2013 se hizo viral un vídeo del divulgador británico Steve Mould en el que se veía cómo una larga cadena emergía de un recipiente y caía al suelo. Sin embargo, en vez de deslizarse sobre la vasija, como lo haría una simple cuerda, la cadena se elevaba «sola» por encima del borde antes de curvarse hacia abajo (*véase la ilustración*). Tan inesperado fenómeno provocó la sorpresa del público y llamó la atención de los físicos. ¿De dónde procedía la fuerza que hacía que la cadena se elevase?

UNA CADENA formada por segmentos metálicos (*a*) o por macarrones (*b*) emerge del recipiente formando un arco que se eleva por encima del borde. El fenómeno no se produce en el caso de una cadena menos rígida (*c*) o una cuerda.

La respuesta es inquietante: ¡es el propio recipiente el que, aunque inmóvil, lanza la cadena hacia arriba! Como veremos a continuación, un ladrillo de madera impulsado hacia arriba por una bala confirma esa explicación y permite entender mejor los mecanismos que intervienen.

Pero tratemos antes de reproducir el experimento original, también conocido como «cadena de Newton». Los primeros resultados se obtuvieron con cadenas de metal similares a las que se usan en los desagües de los lavabos o bañeras. En tal caso, se trata de pequeñas bolitas metálicas unidas por pasadores también metálicos. De esta manera el conjunto se mantiene flexible, aunque los eslabones que forman la cadena sean completamente rígidos.

En el experimento se introduce la cadena en un tarro y se deja uno de sus extremos colgando por el borde, con una longitud suficiente para que sea arrastrada progresivamente hacia afuera bajo la acción de su propio peso. Tras unos instantes, y en concreto después de que el extremo haya tocado el suelo, se establecerá un régimen estacionario: la cadena se elevará por encima del recipiente formando un arco y abandonándolo a velocidad constante. La fuerza motriz es el peso de la porción de cadena comprendida entre el recipiente y el suelo. Como consecuencia, dicha fuerza será constante y tanto mayor cuanto más alto se encuentre el tarro.

De hecho, podemos comprobar que, cuanto más elevado esté el recipiente, tanto más rápida saldrá de él la cadena y tanto mayor será la altura del arco, según una relación aproximadamente proporcional. Por otro lado, al inclinar el tarro veremos que la cadena ya no sale según la vertical, sino formando un ángulo con ella.

Efectuemos un primer balance de las fuerzas que intervienen cuando el conjunto se encuentra en el régimen estacionario. Ni los tramos de la cadena que descansan en el interior del recipiente ni los que se hallan sobre el suelo experimentan tracción alguna. Por tanto, se hallan sometidos a su propio peso, el cual queda compensado por la fuerza de reacción que ejerce la superficie de apoyo.

Para la porción de la cadena que se halla en movimiento, parece razonable suponer que solo experimenta la acción de su propio peso, el cual tira de los eslabones inicialmente inmóviles y los pone en movimiento. Sin embargo, un cálculo rápido muestra que, en tal caso, la cadena no podría elevarse.

Por tanto, para dar cuenta del fenómeno hemos de tomar en consideración un empuje suplementario, el cual solo puede provenir del fondo del recipiente. ¿Cómo lo hace?

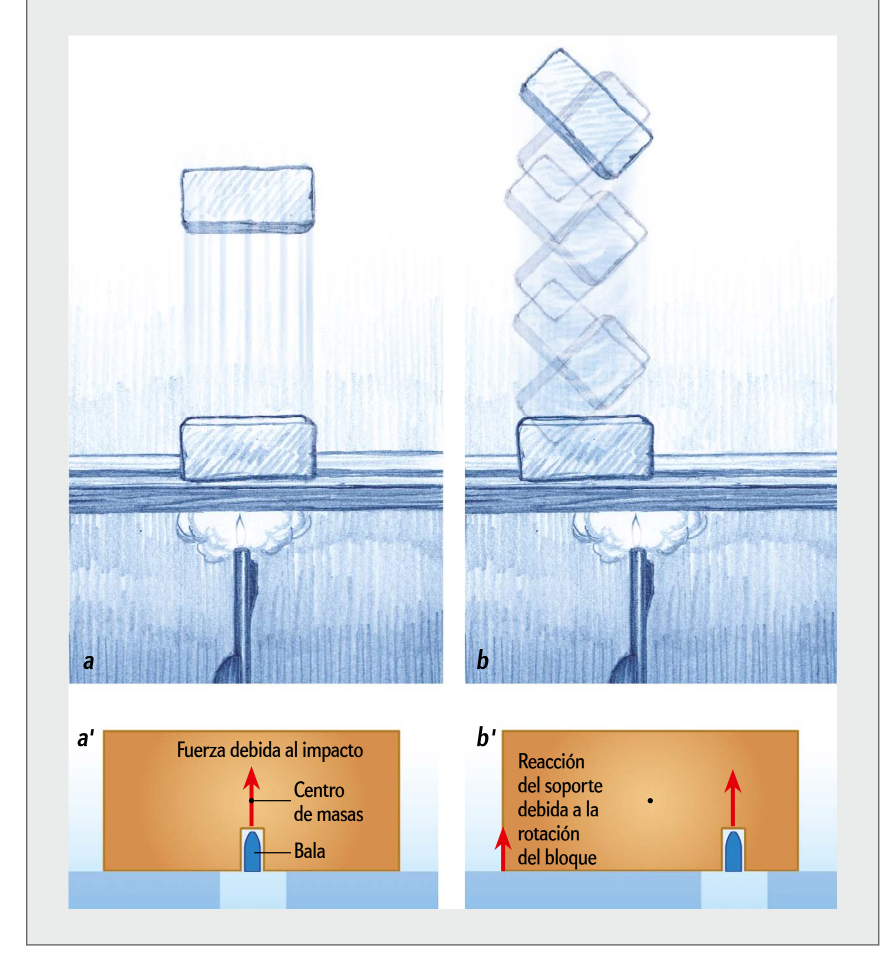
La importancia de la rigidez

Como podremos verificar fácilmente, el efecto desaparece cuando empleamos una cuerda o un hilo. Esto nos lleva a pensar que tal vez la rigidez local de la cadena o su composición desempeñen algún papel.

El físico de la Universidad de Cambridge John Biggins ha comprobado que, si ensartamos bolitas metálicas en un hilo flexible, no se producirá elevación alguna. Sin embargo, si enhebramos macarrones en un hilo de nailon —una práctica sencilla que todos podemos llevar a cabo en nuestra cocina—, el efecto persistirá, aunque será menos espectacular. Ello se debe a que los macarrones carecen de la elasticidad y la consecuente capacidad de rebote del metal. Todas estas consideraciones nos animan a examinar con más detenimiento el efecto de la rigidez de los eslabones.

BLOQUE EN ROTACIÓN

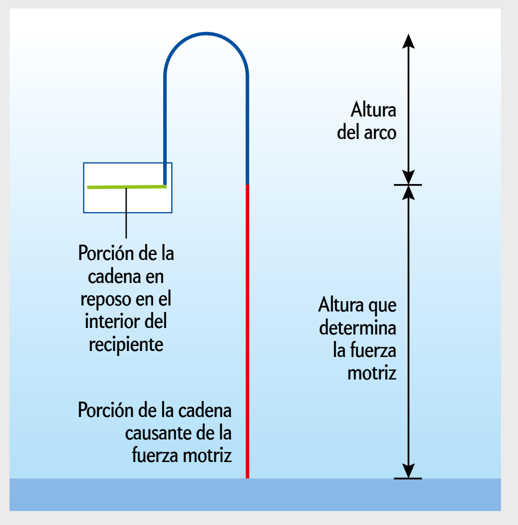
UN EXPERIMENTO SENCILLO muestra que la fuerza de reacción ejercida por una superficie de apoyo puede generar un aumento inesperado en la velocidad de un objeto. Si disparamos una bala contra un bloque de madera que descansa sobre una tabla, observaremos que la altura alcanzada por este cambiará dependiendo de si el impacto tiene lugar en el centro (*a*, *a'*) o sobre un extremo (*b*, *b'*). En este último caso, la fuerza debida al impacto del proyectil genera un par motor que hace que el bloque comience a girar sobre sí mismo. Sin embargo, en un primer momento ese giro se ve impedido en el extremo opuesto: el bloque «tropieza» con el soporte y rebota en este, lo que genera un impulso adicional. Como resultado, el objeto alcanza una altura mayor que en el caso de un disparo centrado.

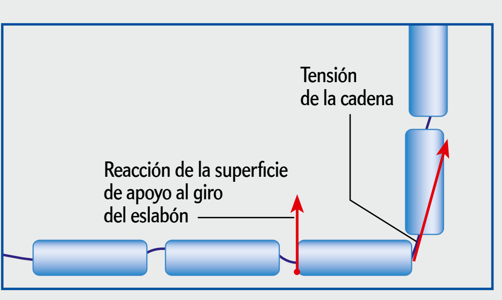


ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

CADENA MÁGICA

EL MISMO EFECTO que genera un impulso adicional en el caso de un bloque de madera apoyado en una tabla explica el comportamiento de la cadena de Newton. En esta, la fuerza principal es la tracción de la cadena, causada por el peso de la porción suspendida entre el recipiente y el suelo (*arriba, rojo*). Dicha tracción se transmite hasta el primer eslabón que descansa en posición horizontal en el interior de la vasija (*abajo*), el cual experimentará una fuerza casi vertical en su extremo derecho que lo hará rotar. La fuerza de reacción que aparece en el lado opuesto provocará un impulso extra que levantará el eslabón.





Un experimento a priori no relacionado nos permitirá ver más clara la importancia de este efecto. La idea fue propuesta por Jim Pantaleone, físico de la Universidad de Alaska en Anchorage, y consiste en tomar una carabina, colocarla en posición vertical bajo un bloque de madera apoyado en una superficie y efectuar un disparo. Al hacerlo, el bloque de madera se elevará. ¿Depende su altura del lugar en el que impacte la bala? (*Véase el recuadro* «Bloque en rotación».)

Es posible que nuestra primera respuesta sea negativa: se trata de un choque perfectamente inelástico (la bala queda alojada en el bloque tras el impacto), por lo que, después de la colisión, la cantidad de movimiento del conjunto formado por la bala y el bloque será igual a la cantidad de movimiento inicial de la bala (puesto que la del bloque es nula). Esta relación básica permite calcular sin ambigüedades la velocidad del conjunto tras el impacto y, por ende, la altura que alcanzará. De hecho, esta predicción se cumple perfectamente si disparamos sobre la región central del bloque de madera.

Sin embargo, a partir de una cierta distancia al centro del bloque observaremos que, cuanto más hacia un lado se produzca el impacto, tanto más subirá el bloque. ¿A qué se debe?

Par motor

Cuando penetra en la madera, la bala se frena y empuja el bloque hasta que se inmoviliza. La fuerza —variable— que resulta del proceso pone en movimiento al bloque y, en concreto, acelera su centro de masas. Pero, al mismo tiempo, dicha fuerza ejerce también un par motor que causa que el bloque comience a girar sobre sí mismo.

Si el par es pequeño, el bloque comenzará a rotar lo suficientemente despacio para que la velocidad de la arista situada en el lado opuesto al impacto (*véase el recuadro* «Bloque en rotación») sea vertical. El bloque despega entonces sin apoyarse en el soporte y sube a la altura dada por la ley de conservación de la cantidad de movimiento.

En cambio, si el par de fuerzas es grande, el giro inducido será rápido y la arista en cuestión se hundiría en el soporte si este no fuese rígido. En la práctica, lo que ocurre es que la arista continúa inmóvil y fuertemente apoyada en el soporte; mientras tanto, el bloque comienza a rotar en torno a esa línea de contacto. En esta fase, muy breve, el soporte ejerce sobre el bloque una fuerza considerable y dirigida hacia arriba, la cual se combina con la que causa el impacto de la bala.

Dado que el ángulo de rotación del bloque durante esta fase es pequeño, las fuerzas que actúan son casi verticales. Como consecuencia, la aceleración del centro de masas será mayor que antes y el bloque ascenderá más que en el caso de un impacto centrado. Si se trata de un bloque no muy grueso, esta situación se producirá en cuanto el impacto se descentre más de un sexto de la longitud de la pieza de madera.

Vuelta a la cadena

¿Qué relación guarda todo lo anterior con la cadena de Newton? Los dos fenómenos que acabamos de describir —una fuerza inicial descentrada y una rigidez suficiente que garantice la rotación del sólido— se hallan presentes en los eslabones de la cadena.

Esto es especialmente fácil de ver en el caso de la cadena de macarrones. Cuando un eslabón está a punto de separarse del fondo del recipiente, experimenta en uno de los extremos una fuerza casi vertical e igual a la tensión de la cadena (*véase el recuadro* «Cadena mágica»). Al igual que antes, a la rotación causada por el par motor resultante se opone una fuerza de reacción ejercida por la superficie de apoyo y aplicada en el extremo opuesto. Como consecuencia, el eslabón adquiere una aceleración y una velocidad superiores a las que le habría imprimido la mera tensión de la cadena, la cual puede ahora elevarse a modo de «fuente».

Existen otros fenómenos emparentados. Por ejemplo, una cadena que cae sobre una mesa verá aumentar su velocidad de caída; y si tiramos con rapidez de una cadena horizontal, una parte se levantará y experimentará una ondulación característica. ¿Se le ocurren al lector otros ejemplos? ■

PARA SABER MÁS

Growth and shape of a chain fountain. John S. Biggins en *Europhysics Letters*, vol. 106, n.º 4, artículo 44001, mayo de 2014.
A quantitative analysis of the chain fountain. J. Pantaleone en *American Journal of Physics*, vol. 85, págs. 414-421, mayo de 2017.
A bullet-block experiment that explains the chain fountain. J. Pantaleone en *The Physics Teacher*, vol. 56, págs. 294-297, abril de 2018.
Enlace al vídeo de Steve Mould: **www.youtube.com/watch?v=_dQJBBklpQQ**

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA FÍSICA

Heisenberg y Bohr en Copenhague

El desencuentro de dos físicos cuánticos

José Manuel Sánchez Ron

En septiembre de 1941, Werner Heisenberg, el creador en 1925 de la primera formulación satisfactoria de la teoría cuántica (la mecánica de matrices), viajó a Copenhague para pronunciar una serie de conferencias en el recientemente establecido Instituto Alemán de Cultura de esta ciudad. Allí residía Niels Bohr, el gran patrón de la física cuántica, a la que había contribuido en 1913 con el primer modelo atómico cuántico. Ambos habían mantenido una estrecha y afectuosa amistad desde hacía casi dos décadas. Pero en 1941 Heisenberg ya no era el joven físico que había pasado tiempo en el Instituto de Física que Bohr dirigía en la capital danesa; lo quisiera o no, ahora visitaba a su antiguo mentor como ciudadano prominente de Alemania, la nación que había invadido Dinamarca. De hecho, las conferencias formaban parte de la política nazi de promover la cultura alemana. Y Heisenberg no era solo un físico teórico sobresaliente; era también uno que estaba trabajando en Alemania en un proyecto para explorar las posibilidades de la fisión del uranio, entre ellas su utilización para la fabricación de bombas de un poder nunca antes alcanzado.

Durante su estancia en Copenhague, Heisenberg visitó a Bohr. Sobre lo que hablaron entonces se ha escrito en abundancia, siendo particularmente conocida la obra de teatro *Copenhague* (1998) escrita por Michael Frayn. Conocida y debatida, pues a Heisenberg se le han adjudicado propósitos muy diferentes: bien que quería sonsacar a Bohr lo que podría saber de los esfuerzos aliados para fabricar bombas atómicas, conocer su opinión técnica sobre la fisión del uranio, o transmitirle sus dudas morales —si es que las tenía— acerca de dotar a Hitler de semejante arma.

Una opinión probablemente bastante neutral es la que presentó en sus memorias (*The joy of insight,* 1991) el físico de origen austriaco Victor Weisskopf (1908-2002), quién, debido a su origen judío, tuvo que instalarse en Estados Unidos. Allí desarrolló una brillante carrera que le permitió trabajar en el Laboratorio de Los Álamos del proyecto Manhattan y ser director general del CERN entre 1961 y 1965. En opinión de Weisskopf, que conocía bien tanto a Bohr como a Heisenberg (había trabajado con ambos), este fue a Copenhague a hablar con Bohr «sobre los problemas que el desarrollo de los explosivos nucleares habían creado para la humanidad y, en particular, para la comunidad de científicos. Resultó ser una desafortunada e inútil visita. Heisenberg no comprendía el profundo odio y la terrible desesperación que invadía a Dinamarca, una nación víctima de los nazis. Se expresó con vaguedad, temiendo que cualquier manifestación sobre el esfuerzo nuclear de Alemania, o cualquier duda acerca de la victoria alemana, le pusiera a él y a su familia en peligro mortal. Bajo estas condiciones fue difícil que Bohr viese a Heisenberg como un discípulo y amigo, y no como un representante del opresor. Por su parte, Heisenberg podría haber esperado confiar en Bohr. Debería haber supuesto que su viejo amigo habría tomado todas las precauciones para evitar que se hubiese escuchado lo que hablasen y que nunca le habría traicionado».

La sombra de lo que Heisenberg pudo haber querido obtener de Bohr para favorecer los intereses de Alemania le persiguió el resto de su vida. Se esforzó por argumentar que su liderazgo fue esencial para retrasar el proyecto nuclear germano, y que no quería que Hitler dispusiera de una bomba atómica. Pero, como todo aquello que entra en el resbaladizo dominio de las interpretaciones, difícilmente pueden extraerse conclusiones firmes. Y no debe olvidarse que los científicos no son seres inmunes a los sentimientos patrióticos. Menos aún Heisenberg.

La interpretación de lo que pudieron hablar se ha basado principalmente en once documentos que se conservan en el Archivo Bohr de Copenhague. Aparte de una carta de Heisenberg, fechada el 22 de diciembre de 1961, en la que únicamente mencionaba detalles científicos pertinentes al momento en que la escribió, esos documentos corresponden a borradores de car-



WERNER HEISENBERG, 1933.

tas o notas privadas de Bohr referidas, en parte, al encuentro de 1941, pero que nunca terminaron enviándose o haciéndose públicas (hasta 1998).

El primero de esos documentos es uno no datado, pero parece que de 1957. Estaba pensado como respuesta de Bohr a una carta que Heisenberg envió al periodista Robert Jungk y que apareció en la primera edición en danés (1957) del libro que este había publicado en alemán en 1956 bajo el título de *Heller als tausend Sonnen*, más conocido por su traducción al inglés *Brigther than a thousand suns* (y su posterior traducción al español *Más brillante que mil soles*). En esa carta, el creador de la mecánica de matrices intentaba, como hizo en otras ocasiones, exonerarse, ante lo cual Bohr escribió:

Personalmente recuerdo cada palabra de nuestras conversaciones, que tuvieron lugar en un trasfondo de extrema tensión y tristeza para nosotros aquí en Dinamarca. En particular, produjo una fuerte impresión tanto en Margrethe [la esposa de Niels] como en mí, y en todos los del Instituto con los que ambos hablasteis, que tú y [Carl von] Weizsäcker [colaborador de Heisenberg] expresarais vuestra firme convicción de que Alemania ganaría la guerra, y que, por tanto, no tenía sentido que mantuviésemos la esperanza de que se produjese un resultado diferente en la guerra y que nos mantuviésemos reticentes con relación a todas las ofertas alemanas de cooperación. También recuerdo con bastante claridad nuestra conversación en mi despacho del Instituto, en la que en términos vagos hablaste de una manera que solamente me podría producir la firme impresión de que, bajo tu liderazgo, se estaba haciendo en Alemania todo lo necesario para desarrollar armas atómicas, y que dijiste que no era necesario hablar sobre los detalles ya que estabas completamente familiarizado con ellos y habías pasado los dos últimos años trabajando de forma más o menos exclusiva en tales preparaciones. Escuché esto sin decir nada, ya que en todo esto estaba implicado tanto para la humanidad que, a pesar de nuestra amistad personal, teníamos que ser considerados como representantes de bandos enfrentados en un combate mortal. Que mi silencio y gravedad, como escribes en la carta, pudiese ser tomado como una expresión de sorpresa ante tus informes de que era posible fabricar una bomba atómica es un malentendido, bastante peculiar, del que debe ser responsable la gran tensión de tu mente.

Y añadía:

Desde el día, tres años antes, en que me di cuenta de que los neutrones lentos podían producir la fisión del uranio 235 y no del 238, se me hizo evidente que se podría fabricar una bomba con determinados efectos separando estos dos uranios. En junio de 1939 incluso había dado una conferencia en Birmingham sobre la fisión del uranio, en la que hablé de los efectos de tal bomba pero por supuesto añadí que las preparaciones técnicas serían tan grandes que no se sabía cuándo podrían ser superadas. Si algo de mi comportamiento se puede interpretar como perturbador, no procedió de tales informes sino más bien de las noticias, tal como yo las entendía, de que Alemania estaba participando vigorosamente en la carrera por ser la primera con armas atómicas.

Además, entonces yo no sabía nada sobre cuán lejos habían llegado ya Inglaterra y América, algo que solamente supe el año siguiente, cuando fui capaz de ir a Inglaterra después de haber sido informado de que la fuerza de ocupación alemana en Dinamarca estaba preparándose para arrestarme.

Bohr tuvo, efectivamente, que abandonar Dinamarca. Ya a comienzos de 1943, a través del Servicio Secreto de Inteligencia británico, había recibido una carta de James Chadwick, el descubridor del neutrón en 1932, en la que le invitaba trasladarse a Inglaterra. «No existe científico en el mundo», le decía Chadwick, «que fuese mejor aceptado tanto para nuestros universitarios como para el público en general», y que sería libre de trabajar en lo que desease. Pero, como había hecho antes con otras invitaciones, declinó entonces la oferta. Sin embargo, a finales de aquel año le avisaron que iba a ser arrestado por la deportación que los alemanes planeaban de toda la población judía de Dinamarca. Aceptó entonces y fue posible trasladarlo con toda su familia a Suecia, desde donde luego él, y un poco más tarde su hijo Aage (futuro nóbel de física), viajaron a Inglaterra. Más tarde, en el otoño de 1944, se unió al proyecto Manhattan, aunque no a tiempo completo. (No solo fueron los Bohr los que escaparon de la amenaza nazi; también se organizó una salida secreta masiva de judíos hacia Suecia, de manera que casi todos los judíos daneses salvaron la vida.)

El mencionado borrador de carta de Bohr (de 1957) es el más interesante de los documentos citados antes, en los que con frecuencia el danés mencionaba que esperaba «tener la oportunidad de hablar con más detalle sobre algunas cuestiones y aclarar varios malentendidos, especialmente en relación con la visita que tú y Weizsäcker hicisteis a Copenhague en 1941, sobre cuyo trasfondo y propósito todavía se preguntan en muchos lugares» (27 de diciembre de 1961). Como se ve, todos esos documentos son muy posteriores a 1941, pero existe otro que data del mismo momento de la visita: una carta que Heisenberg escribió a su esposa Elisabeth, y que arroja alguna luz sobre lo que realmente pensaba:

Copenhague, noche del martes, 16 de septiembre.

¡Mi querida Li!

Aquí estoy de nuevo en la ciudad que tan familiar me es y donde una parte de mi corazón ha quedado atrapada desde de aquel tiempo de hace quince años. Cuando escuché de nuevo por primera vez las campanas de la torre del ayuntamiento, cercana a la ventana de la habitación de mi hotel, resonaron profundamente en mi interior; todo ha permanecido casi igual, como si nada en el mundo hubiese cambiado. Es tan extraño cuando de repente te encuentras una parte de tu propia juventud, como si estuvieras encontrándote contigo mismo. También me gustó el viaje para llegar aquí: en Berlín llovía a cántaros, en Neustreliz tormenta y ráfagas de lluvia como si cayeran de un cubo, en Rostock aclaró, a partir de Wenemünde el cielo estaba casi sin nubes, pero todavía soplaba un fuerte viento del norte, y así permaneció hasta que llegué aquí. Ya tarde por la noche caminé bajo un cielo claro y estrellado a través de la ciudad, para ver a Bohr.



HEISENBERG Y BOHR en Copenhague, alrededor de 1932.

Bohr y su familia están bien; él ha envejecido un poco, sus hijos se han hecho mayores. La conversación giró rápidamente hacia las preocupaciones humanas y los desgraciados sucesos de estos tiempos. Acerca de los asuntos humanos el consenso está dado; en cuestiones de política encuentro difícil que incluso un gran hombre como Bohr no pueda separar completamente pensamiento, sentimiento y odio. Pero probablemente uno no los deba separar nunca. La Sra. Bohr también se encuentra bien; me preguntó mucho por ti y los niños, especialmente por Maria [...] Más tarde, estuve sentado durante mucho rato; solos Bohr y yo. Era ya después de medianoche cuando me acompañó, junto a Hans [Bohr] al tranvía.

La noche del jueves 18 de septiembre, continuaba su carta:

Después de todo, llevaré esta carta conmigo a Alemania y la enviaré desde allí. Por todo lo que he oído, la censura también retrasaría su llegada varios días, de manera que no tiene sentido que un censor leyese esta carta [...] Ayer estuve de nuevo con Bohr toda la tarde; aparte de la Sra. Bohr y los niños, había una joven inglesa que han recibido los Bohr porque no puede regresar a Inglaterra. Es algo extraño hablar con una mujer inglesa estos días. Durante las inevitables conversaciones políticas, donde natural y automáticamente la parte que me tocó fue defender nuestro sistema, ella se retiró y pensé que estuvo bien de su parte que lo hiciera.

Esta mañana estuve en el muelle con Weizsäcker, ya sabes, allí en el puerto, donde está el Langelinie [paseo y parque de Copenhague donde se encuentra la famosa escultura La sirenita*]. Ahora allí están anclados barcos de guerra alemanes, cruceros auxiliares y otros del estilo. Fue el primer día con calor, el puerto y el cielo brillaban [...] En el pabellón del Langelinie comimos, alrededor nuestro había solo gente feliz, alegre, al menos así nos lo parecía a nosotros. En general, la gente parece feliz aquí. Por la noche se ve en las calles a todas esas felices y radiantes jóvenes parejas, probablemente saliendo a bailar por la noche, sin pensar en otra cosa. Es difícil imaginar algo más diferente que la vida en la calle aquí y en Leipzig.*

En el Instituto de Bohr tuvimos algunas discusiones científicas; sin embargo, el grupo de Copenhague no sabe mucho más de lo que sabemos nosotros. Mañana comienzan las conferencias en el Instituto Científico Alemán; la primera conferencia oficial es la mía, mañana por la noche. Tristemente, los miembros del Instituto de Bohr no asistirán por razones políticas. Teniendo en cuenta que los daneses están viviendo con completa libertad y les está yendo tan bien, es sorprendente cuánto odio y temor ha surgido aquí, de manera que incluso un acercamiento en la arena cultural —lo que solía ser automático en el pasado— se ha hecho casi imposible. En el Instituto de Bohr di una breve charla en danés; por supuesto, esto fue como en los viejos tiempos (las personas del Instituto Científico Alemán la habían aprobado explícitamente), pero nadie quiere ir al Instituto Alemán por principio o porque durante y después de su fundación se dieron algunos discursos militaristas sobre el Nuevo Orden en Europa.

Y el sábado 20, proseguía:

Ya solo me queda esta noche en Copenhague. Me pregunto cómo habrá cambiado el mundo cuándo vuelva aquí. Me resulta extraño pensar que, entre tanto, todo continuará siendo igual, que las campanas en la torre del ayuntamiento continuarán sonando cada hora, produciendo una pequeña melodía al mediodía y a medianoche. Y, sin embargo, cuando regrese, la gente será más mayor, el destino de cada uno habrá cambiado, y no sé cómo me irá a mí.

Y continuaba dando a Elisabeth otros detalles que reflejan su mentalidad germana, que no parecía darse cuenta de que nada era normal, que Alemania había invadido la Dinamarca que tantos recuerdos felices le suscitaban. Contaba a su esposa que había asistido a una recepción en la embajada alema na, donde había conocido al arquitecto alemán que había construido el Estadio de Deportes del Reich en Berlín, y que estaba en Copenhague para construir una nueva escuela alemana.

Es casi seguro que Werner Heisenberg no fue nazi, pero más cierto es aún que su ferviente nacionalismo alemán le impedía darse cuenta de que para otros, para los daneses, para Niels Bohr, simplemente era el ciudadano patriota de una nación que había invadido Dinamarca con el único argumento del poder de su ejército. IyC

PARA SABER MÁS

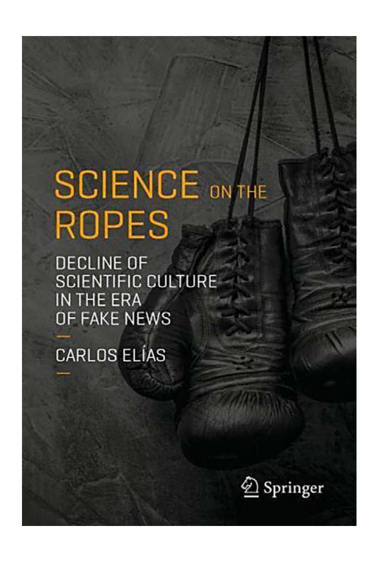
Michael Frayn's «Copenhagen» in debate: Historical essays and documents on the 1941 meeting between Niels Bohr and Werner Heisenberg. Dirigido por Matthias Dörries. Oficina para la Historia de la Ciencia y la Tecnología, Universidad de California en Berkeley, 2005.

Werner Heisenberg y Elisabeth Heisenberg: My Dear Li. Correspondence, 1937-1946. Dirigido por Anna Maria Hirsch-Heisenberg Yale University Press, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica. David C. Cassidy en *IyC*, julio de 1992.

¿Qué le contó Heisenberg a Bohr sobre la bomba atómica? Jeremy Bernstein en *IyC*, julio de 1995.



SCIENCE ON THE ROPES
DECLINE OF SCIENTIFIC CULTURE IN THE ERA OF FAKE NEWS
Carlos Elías
Springer, 2019
330 págs.

Cultura mediática y declive científico

Occidente y la promoción de la irracionalidad

Solo con leer el título de este libro podremos comprobar que su actualidad queda fuera de toda duda. Bombardeados incesantemente por noticias, en un contexto en el que la cantidad de información resulta imposible de asimilar y se aproxima a marchas forzadas a la desinformación, parece «inevitable» que vayan colándose más o menos intencionadamente contenidos cuya veracidad resulta discutible. Hemos pasado ya la fase de la mentira, estamos en otro momento. ¿Cómo afecta todo esto a la ciencia?

Carlos Elías, uno de los referentes en el campo teórico y práctico de la divulgación mediática de la ciencia, propone un trabajo de análisis soportado por la siguiente tesis: la manera de construir la cultura contemporánea, que ya se puede denominar cultura mediática, es la que está entre las causas más perspicuas del declive de la ciencia en Occidente. Qué mejor que un científico periodista, que ha vivido profesionalmente esos dos modos de búsqueda de la verdad, comparta un diagnóstico de lo vivido y de lo pensado para ofrecer, después, el pronóstico de lo que le espera a una cultura posmoderna. Dicha cultura no distingue géneros; promueve modos alternativos de búsqueda de la verdad, todos ellos con la misma legitimidad; asume el pluralismo como renuncia a cualquier jerarquía (por su renuencia a lo impositivo y a lo totalitario), y termina dando la palabra por igual al mago y al científico, al novelista y al investigador.

Según Elías, la verdad de la información en esta atmósfera que nos envuelve ya no tiene nada que ver con los hechos. En la hora de la posfactualidad solo cabe la posverdad: el rumor, el bulo y la falsedad son ya patrimonio de nuestro tiempo, por no hablar de la vida como espectáculo, de la cultura de lo fácil y del consumismo, que triunfan con la potencia insustituible de la imagen, la televisión y lo digital, en un contexto tecnológico que no soporta lo complejo y que implanta un modo de desvalorización de los valores que nos construyeron culturalmente. Valores de los que nació y a los que decididamente contribuyó el saber científico.

Pero, además, a este humus mediático de desafección por la ciencia ha de sumársele el paraguas intelectual del rechazo al saber científico. Tal rechazo se origina en algunas teorías y filosofías alternativas a la modernidad, como las de Kuhn, Lakatos, Popper y Feyerabend, pasando por la Escuela de Frankfurt hasta llegar a la filosofía contemporánea francesa. Añádase a ello la habitual carga de responsabilidad que se atribuye a la ciencia como causante de los grandes desastres de la humanidad, en la línea que va desde Rousseau hasta las acusaciones actuales que señalan a la ciencia como causa de las crisis ecológicas o de los problemas nucleares. Para muchos, en suma, no es cierto hoy que el método científico sea el modo privilegiado de obtención de la verdad.

Los datos son tercos y muestran que Occidente se ha dejado llevar por el tipo de vocaciones profesionales vinculadas a las humanidades y a las ciencias sociales. Elías vincula todo ello al auge de lo irracional, de lo que Umberto Eco denominó «lo mágico», donde se incluyen también las artes y el cine, con su aprecio por la ficción y por lo pseudocientífico. Mientras, el este asiático se ha convertido en primera potencia debido al incremento de los estudiantes de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM, por sus siglas en inglés). Puede ser vivido como un drama científico, por ejemplo, el cierre en 2006 del Departamento de Química de la Universidad de Sussex, de donde salieron tres premios nóbel. No es extraño, pues, que Occidente, ante la demanda de estas profesiones vinculadas a las ciencias duras, tenga que importar talento.

El texto de Elías, excelente en actualidad bibliográfica, en estudios de campo y en datos, expone un amplio conjunto de explicaciones sociológicas, económicas y políticas de esta dejación vocacional y de esta falta de incentivos científicos, así como las causas intracientíficas de este declive. Entre estas últimas están la precariedad laboral y el exceso de competitividad en una actividad como la investigación, dependiente cada vez más de fuertes inversiones, de apoyo empresarial, de proyectos públicos y de trabajo colectivo. Todo ello quizá redunde en un sistema que, si se piensa bien, aunque ha incrementado exponencialmente sus publicaciones —con todo un modelo editorial que también alberga fraudes—, en la opinión de Elías ya no aporta nada significativamente nuevo.

Lo que en mi opinión debe discutirse con el autor de este excepcional trabajo de investigación es por qué, aun coincidiendo con su tesis, reafirmándonos en su análisis cultural, insistiendo en su determinación y apasionamiento racional, e incluso acogiéndonos al patrocinio de Aristóteles (modelo para los científicos que no deben rechazar la retórica expositiva, para los estudiosos de humanidades que deben reconocer la potencia del método científico, y sobre todo garante de que puedan darse «otros modos de verdad»), opta por un tono de enfrentamiento entre las ciencias humanas y las naturales —con la acrítica aceptación de que el método científico experimental goza del patrimonio de la verdad— y por afirmaciones excesivas y poco fundadas que quizá rebajen el alto nivel investigador de su trabajo.

Así, Elías llega a lamentar que el modelo universitario salmantino haya influido en la universidad latinoamericana, haciendo de esta influencia la causa de la pobreza estructural de estas regiones. O a insistir en que, después de la Contrarreforma, un católico no puede defender la ciencia; a preguntar si no podrán ser los sociólogos y los filósofos posmodernos

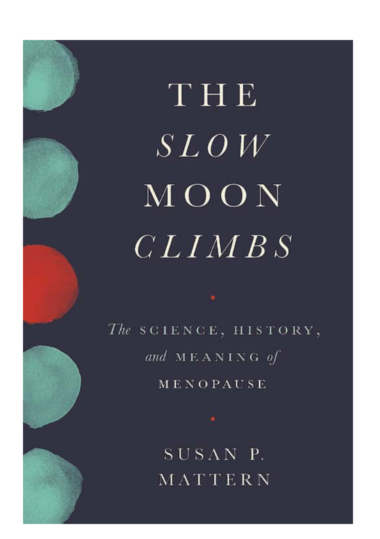
los nuevos jesuitas de la contrarreforma; a sostener que la derecha es religiosa y anticientífica mientras que la izquierda es atea y apasionada por la ciencia; a asumir que la potencia de China tiene que ver con que allí hayan sido irrelevantes Kant, Shakespeare o Velázquez, y no los estudios de química, biología o física; o a advertir que santa Teresa y sus éxtasis, por poner un último ejemplo, son expresión de brujería y de irracionalidad.

Para superar el tono de enfrentamiento y las aseveraciones inveraces que empañan el resultado investigador, resulta muy apreciable la última parte del libro, en la que el autor modera sus posiciones iniciales hacia un punto de encuentro. A la vez, reclama un escrupuloso trabajo científico ajustado al método estrictamente matemático-racional, y reconoce la importancia que para las ciencias naturales tienen las ciencias humanas y viceversa. ¿No exigió Platón al filósofo en ciernes saber geometría? ¿No fueron los grandes médicos impresionantes filósofos? ¿No se entendió la física de la Revolución Científica como filosofía natural? ¿No influyó la teoría atómica de Demócrito y Leucipo en el materialismo dialéctico de Marx? Si hay alguna verdad, es esta: que la verdad necesita una mirada mucho más amplia que la que nos proponen la anticiencia, por un lado, y el cientificismo, por el otro.

Y es que, cuando buscamos culpables absolutos para fenómenos complejos, a veces la cuenta no sale del todo bien. No sé si, como propone Elías, con *La estructura de las revoluciones científicas* Kuhn será el padre de todo el declive del proceder científico natural. Lo que sí es cierto es que, gracias a la pragmática de la ciencia, nos hemos dado cuenta de que el trabajo científico no tiene que ver solo con una construcción lógico-matemática, sino que nace en un contexto determinado, con unos problemas concretos y con unos objetivos en muchos casos extracientíficos. Quizás haya que insistir en que determinadas metodologías de humanidades y ciencias sociales revelan intereses a veces dudosamente racionales, menos empeñados en la búsqueda de la verdad que en la justificación de presupuestos ideológicos. Y tampoco se puede negar que en la voluntad de unificación metodológica trasluce una concepción reduccionista de la ciencia, con la consiguiente «fetichización de los hechos», que diría Husserl. Es posible que el método hipotético-deductivo popperiano y su criterio falsacionista tengan más de convicción que de ciencia. Pero es difícil señalar un teórico de la ciencia con más y mejor repercusión sobre lo político (en lo que significa su falibilismo) y con mayor aprecio hacia la verdad, de la cual todos «somos buscadores, pero nunca sus poseedores».

En definitiva, debo recomendar este libro por su potencia investigadora, su encomiable acopio documental y su convicción y pasión racional, no sin reconocer, a la vez, que todas esas fortalezas pueden sostenerse desde un tono más dialogante, menos cientificista y, por tanto, más científico todavía.

—José Manuel Chillón,
Universidad de Valladolid



THE SLOW MOON CLIMBS
THE SCIENCE, HISTORY AND MEANING OF MENOPAUSE

Susan P. Mattern
Princeton University Press, 2019
480 págs.

El significado de la menopausia

Un recorrido histórico y cultural para entender un enigma evolutivo

¿Qué tienen en común todas las abuelas? Con independencia de esa habilidad especial para encontrar remedios a cualquier dolencia, todas ellas comparten algo más: la incapacidad biológica para seguir teniendo hijos. Esto no sucede en los abuelos, quienes, como ocurrió en el famoso clan de los Iglesias, pueden llegar a tener hijos y nietos de la misma edad. Ahora bien, si el principal motor de la vida es la expansión de los propios genes a través de la reproducción, no parece que tenga mucho sentido para la especie ni para el individuo que las mujeres perdieran esa capacidad a partir de determinada edad. Desde un punto de vista evolutivo, por tanto, la menopausia plantea un gran enigma. Y sin embargo, algo deberá aportar a la humanidad para que haya perdurado a lo largo de los siglos.

De hecho, ¿qué sabemos de la menopausia? El inicio de la vejez y todo lo que conlleva no suele ser tema habitual de conversación. Sin embargo, seguramente todos podamos, con mayor o menor detalle, hablar sobre la menstruación: hay productos higiénicos para ello; *apps* para controlarla y ayudar a prever síntomas o período de fertilidad, e incluso bromas al respecto. Sobre la menopausia, en cambio, todos hemos oído hablar de los sofocos, del cansancio en las articulaciones o del insomnio, pero posiblemente poco más. Así presentada, desde nuestra mirada occidental resulta difícil recibir la menopausia como un ingenio útil de la evolución, y desde luego no parece una etapa vital que la mujer espere con impaciencia. Parece interesante debatir entonces sobre su aporte evolutivo: comprobar, por ejemplo, si alguna otra especie animal distinta de la humana experimenta la menopausia y qué implicaciones tiene sobre su conducta, o analizar qué se lleva diciendo desde antiguo sobre este período de la vida en distintas culturas y épocas. Tal vez así logremos sacar algo en claro.

Esa es la idea de Susan Mattern: abordar la menopausia desde todos los ángulos posibles, desde la perspectiva científica, histórica y antropológica. Se trata sin duda de una buena idea y muy pertinente (no conozco ningún otro libro que lo haya hecho antes con ese afán de detalle), pero creo que la ejecución no es afortunada.

Me ha ocurrido como esas veces en las que un tráiler convierte una película en prometedora, pero luego termina siendo mejor que la película en sí.

El origen etimológico de la palabra *menopausia*, por ejemplo, no aparece hasta más allá de la mitad del libro, a pesar de que la definición de un concepto resulta esencial para situar al lector y enmarcar un discurso. Ello es debido a que la autora se pierde en extensas narraciones sobre cuestiones presumiblemente afines a la menopausia pero muy tangenciales, con lo que se va alejando progresivamente del discurso y el lector acaba preguntándose qué tiene que ver todo aquello con lo que había venido a leer. Esto es especialmente visible en uno de los capítulos donde se dedica a desmenuzar las tradiciones y formas de vida de distintas tribus, con el pretendido objetivo de entender cómo afectan a su concepto de menopausia. Sin embargo, las páginas avanzan y el objetivo no llega. Las descripciones son interesantes, no cabe duda. Es precioso saber qué comen los miembros de esas tribus tan apartadas o cómo estructuran su día a día; cualquier estudiante de antropología cultural las recibiría encantado. Pero la autora no llega a transmitir cómo todos esos contextos culturales y modos de organización social han influido sobre la vivencia de determinados eventos biológicos.

Ahora bien, si se capta la reflexión implícita en sus palabras, el debate que se puede extraer es maravilloso. ¿Son universales las enfermedades? ¿Qué sucedería si dos culturas viviesen de forma diferente los mismos síntomas porque los interpretan de distinta manera? [*véase* «¿Qué significa estar sano o enfermo?, por Cristian Saborido; Investigación y Ciencia, enero de 2018»]. Por ejemplo, si una cultura interpreta ciertos síntomas como incapacitantes y otra como naturales, parecería obvio que los diagnósticos y la producción de toda una industria farmacéutica no sean los mismos en una y otra. Darse cuenta del impacto social que puede tener la vivencia cultural sobre la salud no es una cuestión baladí. Y tal vez ese sea el caso de la menopausia.

Muchas mujeres podrían estar sufriendo al ver llegar su declive reproductivo y sentirse yermas, mientras que otras vivirían con orgullo ser partícipes de la comunidad contribuyendo con su conocimiento acumulado a distintas actividades para las que antes no tenían tiempo. En estas últimas sociedades, la menopausia estaría despatologizada y subyacería la idea de *high productivity and zero reproductivity* («alta productividad y cero reproducción»), que es la base de la denominada «hipótesis de la abuela», la cual entiende a las abuelas como pilares fundamentales de las sociedades, al ser miembros cuidadores y organizativos de las generaciones más jóvenes. Esta reflexión me recuerda a la vivencia de la jubilación: hay quien la interpreta como el final de la producción laboral y quien la ve como el principio de un nuevo tipo de producción, más personal y participativa. En todo caso, impacta reconocer que la cultura pueda influir tanto sobre la salud y la medicina en general.

The slow Moon climbs es, en definitiva, una amalgama interesante de datos, con un hilo discursivo lento, descarrilado y en ocasiones muy repetitivo, pero al que hay que reconocer el valor de haber sido pionero en abordar un tema poco estudiado. La experiencia profesional de la autora, historiadora, se halla presente en la manera de exponer las diferentes teorías y contextualizarlas en sus distintas épocas, lo que resulta de gran ayuda para entender otras culturas.

No obstante, también su opinión está presente desde las primeras páginas, y resulta difícil despegarse de ella para generar una visión propia. Creo que esto es un error, ya que en los libros divulgativos los autores adquieren el compromiso de acercar un determinado campo a lectores legos, y eso conlleva la responsabilidad de conseguirlo mediante una neutralidad impecable. Esa neutralidad permite al lector recibir toda la información para después decidir por sí mismo cómo afecta a su vida y a su forma de pensar. Podemos hablar de un acto generoso y hasta paternal por parte del autor, que lo convierte en descubridor y guía. En cambio, la apuesta firme por una postura concreta puede vivirse como tendenciosa o poco rigurosa. Quizás en el caso que nos ocupa algo así sea necesario para combatir todos los prejuicios que han podido generarse sobre la menopausia, así como para poner en valor el esfuerzo de millones de mujeres que, una vez incapacitadas para tener hijos, fueron capaces de gestionar hogares, criar nietos y aconsejar a hijos sobre el futuro que les esperaba. Ojalá este libro sea el acicate de muchos otros que encuentren en la menopausia un terreno fértil.

—Nereida Bueno Guerra,
Universidad Pontificia de Comillas

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



CIENTÍFICAS QUE CONDUCÍAN AMBULANCIAS EN LA GUERRA
Y OTRAS MUJERES EN LA CIENCIA
Carlos Prego Meleiro
Prólogo de Marta Macho-Stadler
Libros.com, 2020
ISBN: 978-84-17993-02-3
208 págs. (16 €)



FANTASMAS DE LA CIENCIA ESPAÑOLA
Juan Pimentel
Marcial Pons, 2020
ISBN: 9788417945015
416 págs. (26,60 €)



ESO NO ESTABA EN MI LIBRO DE RADIACTIVIDAD
Alfonso Martínez
Guadalmazán, 2020
ISBN: 978-84-17547-16-5
368 págs. (19,95 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

JUNIO

1970

Interruptores de genes

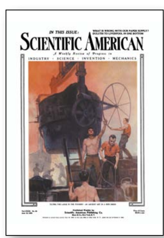
«¿Cómo se controlan los genes? Todas las células deben ser capaces de activarlos y desactivarlos. Por ejemplo, una célula puede que necesite diferentes enzimas a fin de digerir un nuevo nutriente ofrecido por un entorno distinto. A lo largo del ciclo biológico de un simple virus, sus genes funcionan secuencialmente mediante una sucesión de acciones reguladas en el tiempo. Conforme se desarrollan organismos más complejos a partir de un cigoto, sus células activan y desactivan miles de genes, y esa conmutación prosigue a través del ciclo biológico del organismo. La conmutación requiere la acción de numerosos controles específicos. Durante los últimos diez años se ha aclarado un mecanismo de ese control en términos moleculares: el control de genes específicos por ciertas moléculas llamadas represoras.

—Mark Ptashne y Walter Gilbert»

Gilbert compartió el premio Nobel de química de 1980 por su trabajo sobre los ácidos nucleicos.



1970



1920



1870

1920

Megafonía

«El proceso de desarrollo del sistema telefónico altoparlante instalado en el Coliseo de Chicago ha durado unos diez años. La mayoría del trabajo se hizo en el laboratorio sito en una de las calles más concurridas y ruidosas de la zona portuaria de Nueva York. En medio de todo el estruendo de mil caballerías y motores resonando en el empedrado, a los conductores les sorprendía oír una extraña voz, en apariencia cerca de sus oídos, que recitaba, pausada y claramente, una canción infantil como "*Hickery, dickery, dock, the mouse ran up the clock*". Sin embargo, apenas podían ver el altavoz en el tejado del alto edificio del laboratorio, ni adivinar que se estaban haciendo unas pruebas que facilitarían la designación de un candidato a la presidencia.»

1870

La era del maquinismo

«Un solo establecimiento de esta ciudad, la compañía de máquinas de coser Singer, produce quinientas máquinas al día. Los talleres funcionan noche y día.»

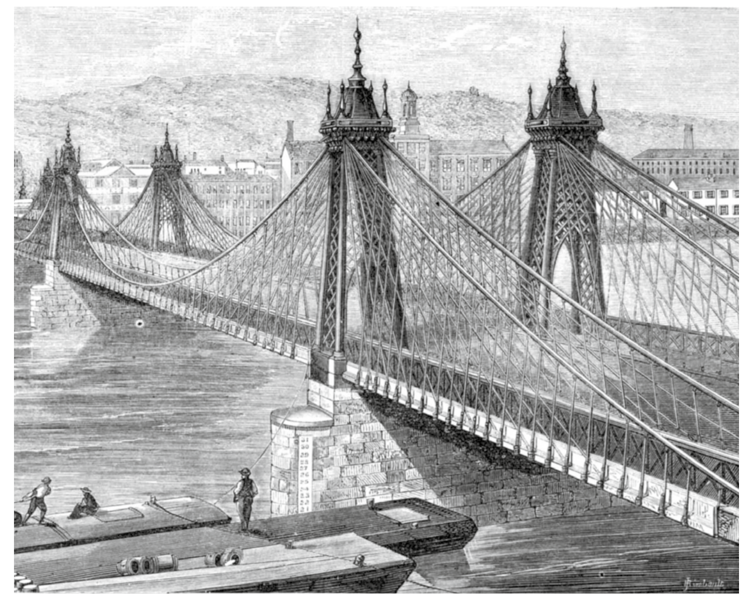
La belleza en unos cables

«El puente de Allegheny en Pittsburgh: Nos parece expresar una opinión general entre ingenieros y arquitectos al afirmar que el puente que aparece en nuestro grabado de la semana es la estructura más elegante entre las de su clase en este continente. Nada puede exceder a la gracia de su silueta vista desde un ángulo favorable. Este hermoso puente fue diseñado y erigido en 1860 por el difunto John A. Roebling.»

El puente de la calle Sexta fue demolido en 1892 para ceder su lugar a una estructura más robusta capaz de resistir el tráfico moderno.

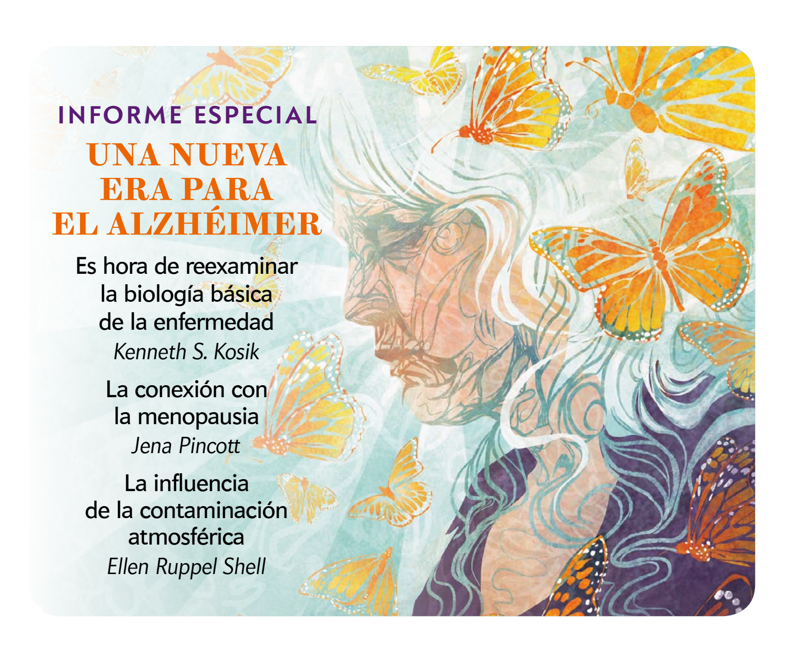
Alfred Wallace y Charles Darwin

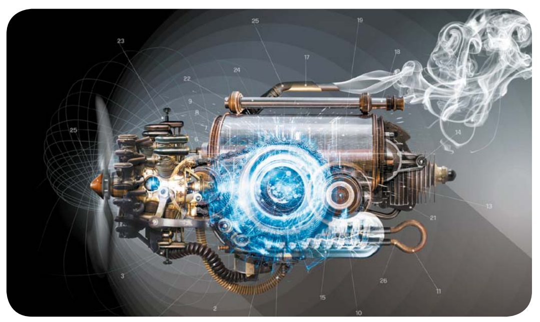
«El último libro de Alfred Russel Wallace, una colección de ensayos titulada *Contributions to the theory of natural selection*, merece una crítica bien meditada, y lo hemos retenido en el escritorio algunas semanas, esperando poder dedicarle, con la calma necesaria, una lectura a fondo que permita ordenar en forma de análisis, para nuestros lectores, sus puntos destacados. Aún no hemos hallado tiempo para ello, pero podemos asegurar a todos los amantes de la historia natural, y a todos a quienes deleita la investigación original de cualquier clase, que no emplearán mejor su tiempo que leyendo atentamente esta obra. Franca y modestamente, el autor expone sus alegatos sobre la generación de la teoría evolucionista del origen de las especies, a la vez que reconoce que pocos salvo el señor Darwin, ni siquiera nadie que hoy viva, pudo haber culminado la gran labor de la cual procede la fama de aquel gran filósofo. El libro, por tanto, está escrito sin ánimo de competir ni menospreciar, sino con un sincero deseo de fomentar la verdadera ciencia.»



1870: El elegante puente de John A. Roebling saca el mayor provecho de los materiales de construcción férreos.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXII, N.º 25, 18 DE JUNIO DE 1870





FÍSICA

Steampunk cuántico

Nicole Yunger Halpern

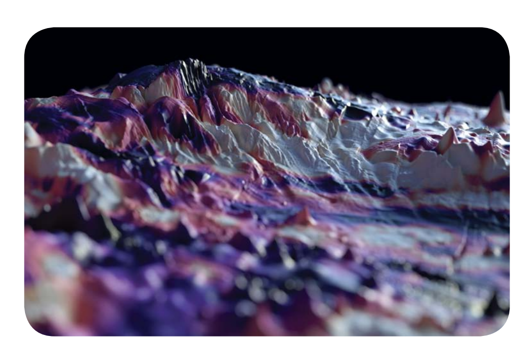
Al igual que la ficción *steampunk* une el estilo victoriano con las tecnologías modernas, existe una nueva rama de la física que actualiza la termodinámica del siglo XIX para su aplicación a los sistemas cuánticos de hoy.

TECNOLOGÍA

El traje nuevo de la inteligencia artificial

Ramon López de Mántaras

Cada vez más decisiones de calado se están dejando en manos de máquinas presuntamente «inteligentes» que no comprenden absolutamente nada. Por el bien de todos, urge una revisión crítica del los supuestos logros de este campo de investigación.



GEOLOGÍA

El macizo volcánico de Tamu

William W. Sager

Una nueva interpretación de este descomunal macizo reescribe la historia sobre la formación del fondo oceánico.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Fabio Teixidó: *Apuntes* y *Tornados de fuego*; Andrés Martínez: *Apuntes*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes*; Ernesto Lozano y Emma Hodcroft: *Así se propaga la COVID-19*; M. Gonzalo Claros: *Un equipo de paleontólogos asegura haber encontrado ADN de dinosaurio, Ocho estrategias para obtener una vacuna contra el nuevo coronavirus* y *A mayor estrés, más canas*; Pedro Pacheco González: *Perseguir a los coronavirus* y *¿Cómo evolucionará la pandemia de COVID-19?*; Ana Mozo García: *Medicamentos por la vía rápida* y *Vacunas de ADN y ARN contra la COVID-19*; Bartolo Luque: *El problema de los tres cuerpos*; Carlos Lorenzo: *La primera historia*; Mercè Piqueras: *El trópico llega al mediterráneo*; J. Vilardell: *La cadena de Newton* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España